

Повышение точности автоматизированного контроля ответственных изделий

© М.Е. Лиморенко, Е.О. Подчасов, А.Д. Терентьева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Повышение требований к точности изготовления поверхностей деталей машин усложняет промежуточный контроль и приемосдаточные испытания, но позволяет снизить уровень брака. Однако повышенные требования к точности существенно затрудняют технологию контроля и выдвигают более серьезные требования к измерительной технике. Для решения этой задачи можно проводить многократные измерения с обязательным условием оптимизации их количества. Поскольку применение методики для определения минимально необходимого количества измерений на основе коэффициента Стьюдента, описанной в классической литературе, связано с неопределенностью, авторы предлагают в целях преодоления указанных сложностей использовать метод последовательного анализа с введением безразмерных критериев стабилизации процесса. Он позволяет выявить минимально необходимое количество измерений, исходя из характеристик технологического процесса.

Ключевые слова: машиностроение, ответственные детали, точность изготовления и измерений, контроль, автоматизация, последовательный анализ

Введение. Важной тенденцией развития современного машиностроения является повышение требований к точности обработки различных поверхностей деталей и узлов. Это усложняет контроль производства на промежуточных этапах, который позволяет понизить уровень брака и сократить время приемосдаточных испытаний при осуществлении формообразующих операций ответственных поверхностей изготавливаемых деталей. При контроле линейных величин используют измерительную технику с точностью, на разряд превышающей измеряемую величину, что, в свою очередь, обуславливает появление новых сложностей, таких как отсутствие указанной характеристики у имеющегося оборудования, чрезмерное удорожание технологического процесса и, как следствие, готового изделия, технологические проблемы осуществления контроля, связанные с конфигурацией деталей. Таким образом, для контроля высокоточных линейных величин с использованием имеющейся универсальной измерительной техники следует проводить многократные измерения.

Целью настоящей работы является оптимизация количества многократных измерений.

Анализ проблем точности контроля ответственных изделий с применением многократных измерений. Проведение многократных измерений создает сложность выбора необходимого их мини-

мального количества. В классической литературе [1, 2] описана методика, используемая для этого, которая основывается на расчетах предварительно выбранного коэффициента Стьюдента. Применение методики связано с некоторой неопределенностью, поскольку коэффициент Стьюдента представляет собой функцию от количества измерений. Следовательно, необходимое минимальное количество измерений, рассчитанное по классическим методам, зависит от предварительного выбора предполагаемого количества измерений, поэтому определение количества измерений, оптимального с точки зрения точности и экономичности, невозможно.

Для оптимального выбора количества измерений рекомендовано применение метода последовательного анализа [3]. Его идея состоит в непрерывном формировании выборки из наблюдений с прекращением наблюдения в наиболее подходящий момент времени, что позволяет сократить количество измерений без ухудшения точности и оптимизировать решение многошаговых задач [4–7].

Для определения количества измерений, превышение которых не приводит к существенному повышению точности, предлагаются [1] следующие безразмерные критерии стабилизации процесса.

1. Критерий колебаний среднего:

$$T_1(n) = \frac{x(i)_{\text{cp}} - x(n+1)_{\text{cp}}}{x(n)_{\text{cp}}},$$

где n — текущее количество измерений; $x(i)$ — текущее значение измеряемой величины.

2. Критерий приращения колебаний среднего:

$$T_2(n) = T_1(n) + T_1(n+1).$$

3. Критерий колебания среднего квадратического:

$$T_3(n) = \frac{S(n) - S(n+1)}{S(n)},$$

где $S(n) = \sqrt{\frac{1}{1-n} \sum_{i=1}^n (x(i) - x(n)_{\text{cp}})^2}$ — среднеквадратическое отклонение.

4. Критерий приращения колебаний среднего квадратического:

$$T_4(n) = \frac{D(n) - D(n+1)}{D(n)},$$

где $D(n) = x(n)_{\text{cp}} \pm t_{\text{av}} \frac{S(n)}{\sqrt{n}}$ — дисперсия величины.

Подбор эффективных критериев ведет к сокращению количества измерений, однако стабилизация процесса по каждому из указанных критериев для случайных выборок происходит неоднородно [8, 9]. По этой причине необходимо исследовать предлагаемые критерии как независимо, так и совместно, чтобы проанализировать влияние характеристик случайных процессов на их стабилизацию по каждому из критериев. При этом под случайным процессом подразумевается любой процесс без систематической составляющей. Процесс, содержащий как случайную, так и систематическую составляющие, называется реальным процессом.

В случае если исследуемая выборка характеризуется случайной погрешностью [10], то в зависимости от требований к точности контролируемого изделия задается допустимый уровень разброса значений указанных критериев T_1, T_2, T_3, T_4 . Границы диапазона допустимого уровня разброса значений могут быть заданы симметрично либо асимметрично относительно нулевой линии.

Моделирование технологического процесса и методика проведения исследований. Для оценки эффективности метода последовательного анализа на основании указанных критериев проводится математическое моделирование выборки из 50 псевдослучайных чисел в интервале от 0 до 10, взятых по равномерному закону распределения, после чего производится расчет изменений исследуемых критериев T_1, T_2, T_3, T_4 при последовательном анализе.

Результаты исследований различных последовательностей случайных чисел, сгенерированных по равномерному закону, представлены в табл. 1, из которой ясно, что колебания среднего количества измерений, необходимого для стабилизации процесса, невелики. Как только процесс перестанет выходить за границы интервала, заданного пользователем, его можно считать стабильным, а количество измерений $n(T_i)$, следующее после скачка процесса, вышедшего за пределы интервала, достаточным. Если учитывать одновременно все четыре критерия T_1, T_2, T_3, T_4 , то результат будет еще точнее.

Таблица 1

Средние значения количества измерений n , необходимых для стабилизации процесса, при различных последовательностях случайных чисел

Номер выборки	$n(T_1)$	$n(T_2)$	$n(T_3)$	$n(T_4)$
1	8,341	12,822	9,662	10,899
2	8,955	12,850	9,554	10,893
3	8,355	13,028	9,502	10,895
4	8,876	12,951	9,559	10,896
5	8,312	12,873	9,660	10,890

Анализ результатов математического эксперимента выявил сходимость решений для аналогичных исходных данных и показал, что необходимое минимальное количество измерений для стабилизации процес-

са, в которых присутствует исключительно случайная погрешность, определяется критерием T_2 приращения колебаний среднего.

Приведены аналогичные эксперименты при различных значениях амплитуды, размерность которой совпадает с размерностями измеряемой величины и случайной составляющей погрешности (табл. 2).

Таблица 2

Среднее значение количества измерений n , необходимое для стабилизации, при различных амплитудах случайной величины

Диапазон	$n(T_1)$	$n(T_2)$	$n(T_3)$	$n(T_4)$
0...0,1	8,341	12,822	9,662	10,899
0...1	8,340	12,900	9,670	10,879
0...2	8,370	12,827	9,597	10,896
0...25	8,341	12,987	9,477	10,887
0...100	8,350	12,885	9,779	10,915

При сравнении данных из табл. 1 и 2 выявлено, что средние значения количества измерений практически не изменились, на основании чего можно сделать следующий вывод: при наличии в процессе только случайной погрешности амплитуда не оказывает влияния на стабильность процесса измерения. Исходя из этого принято допущение о постоянстве необходимого количества измерений для выборки со случайной погрешностью. Для дальнейших расчетов приведенные в табл. 1 значения приняты за эталонные, которые указывают на наличие только случайной погрешности в процессе.

При обработке экспериментальных исследований важно выявить и исключить систематическую погрешность [11, 12]. Причины ее появления при многократных измерениях разнообразны, например вибрации или невозвращение датчика на нуль [13]. Для их устранения необходимо исследовать закономерности взаимного влияния случайных и систематических погрешностей и оценить результаты измерения.

На основании результатов исследования процессов только со случайной погрешностью можно определить, как проходит стабилизация процессов с долей систематической погрешности, изменяющейся по линейному закону $y = kn$. Для этого к значениям случайного процесса следует прибавить результаты линейной систематической погрешности (вида $y = kn$) с различными значениями k (табл. 3).

Таблица 3

Среднее значение количества измерений n , необходимое для стабилизации, при различных последовательностях случайных чисел с добавлением систематической погрешности

k	$n(T_1)$	$n(T_2)$	$n(T_3)$	$n(T_4)$
0,5	7,387	8,623	19,238	15,140
1,0	7,462	7,201	17,599	13,622
2,0	8,012	6,014	15,504	10,932
10,0	9,529	4,257	11,554	5,458
30,0	10,069	3,885	11,032	4,167

По полученным данным можно сделать вывод о том, что наличие доли систематической погрешности в исследуемом процессе указывает на увеличение среднего значения объема выборки по критерию T_3 по сравнению со случайной, составляющей погрешности, и превышение им других коэффициентов вне зависимости от коэффициента k линейной составляющей систематической погрешности.

Исследование и выявление одновременного влияния амплитуды случайной составляющей погрешности и коэффициента k линейной составляющей систематической погрешности. Для выборки, содержащей одновременно случайную и систематическую составляющие погрешности, распределенные по линейному закону, можно предположить, что необходимое минимальное количество измерений определяет только критерий T_3 . Для исследования выдвинутого предположения о влиянии критерия T_3 на количество изменений n были дополнительно проведены математические эксперименты, которые выявили одновременное влияние амплитуды случайной составляющей погрешности A и коэффициента k линейной составляющей систематической погрешности при условии отсутствия систематической составляющей, распределенной по периодическому закону (рис. 1).

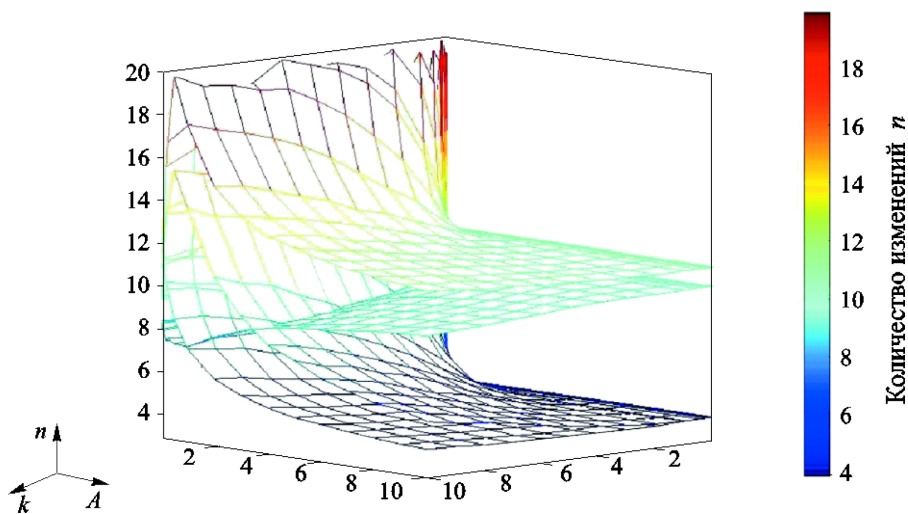


Рис. 1. Зависимость влияния амплитуды случайной составляющей погрешности и коэффициента k линейной составляющей систематической погрешности

По данным на рис. 1 видно, что изменение случайной составляющей погрешности при постоянном значении систематической погрешности оказывает незначительное влияние на все четыре критерия T_1, T_2, T_3, T_4 при последовательном анализе (рис. 2–5).

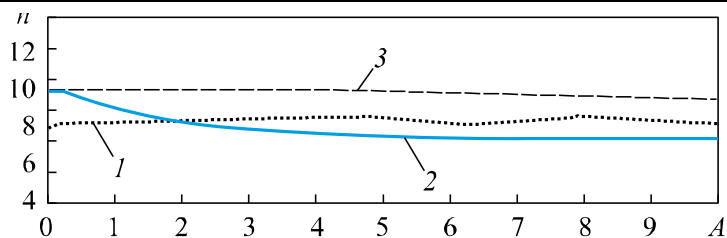


Рис. 2. Зависимость изменения амплитуды случайной составляющей погрешности при постоянном значении систематической погрешности для критерия T_1 :
 1 — $k = 0,001$; 2 — $k = 0,5$; 3 — $k = 10$

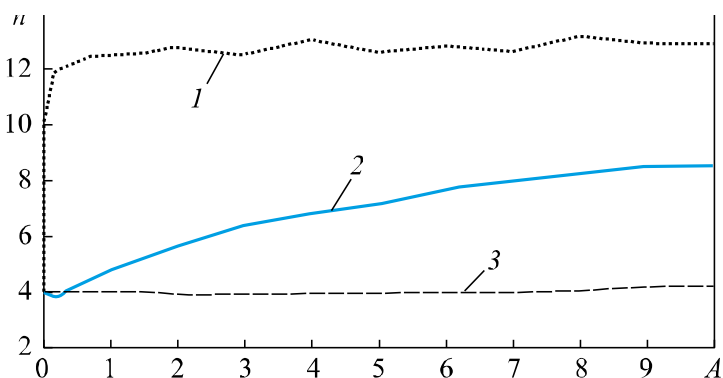


Рис. 3. Зависимость изменения амплитуды случайной составляющей погрешности при постоянном значении систематической погрешности для критерия T_2 :
 1 — $k = 0,001$; 2 — $k = 0,5$; 3 — $k = 10$

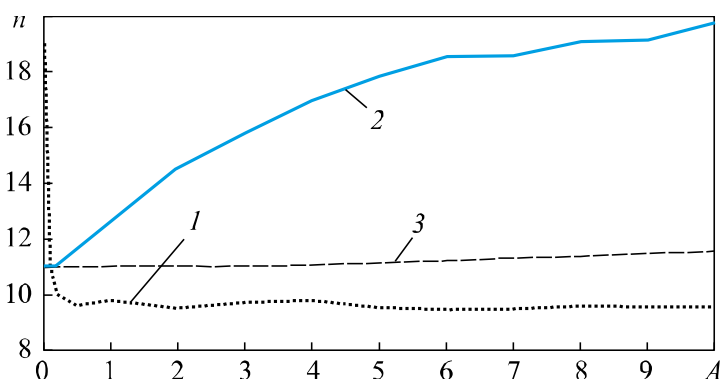


Рис. 4. Зависимость изменения амплитуды случайной составляющей погрешности при постоянном значении систематической погрешности для критерия T_3 :
 1 — $k = 0,001$; 2 — $k = 0,5$; 3 — $k = 10$

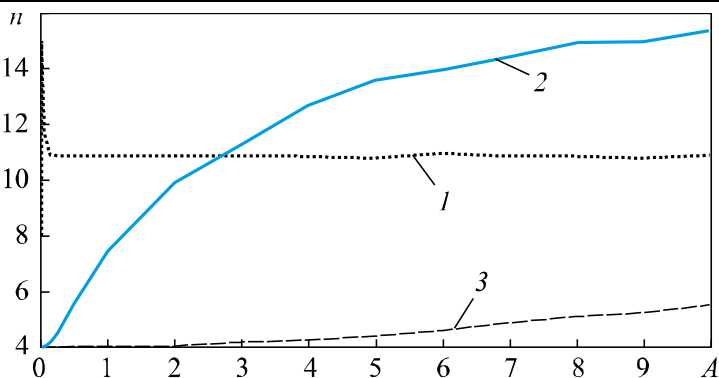


Рис. 5. Зависимость изменения амплитуды случайной составляющей погрешности при постоянном значении систематической погрешности для критерия T_4 :
 1 — $k = 0,001$; 2 — $k = 0,5$; 3 — $k = 10$

По представленным графикам (см. рис. 2–5) зависимостей изменения амплитуды A случайной составляющей критериев T_1 , T_2 , T_3 , T_4 при постоянном значении систематической составляющей погрешности можно сделать следующие выводы.

1. В случае когда коэффициент k линейной составляющей систематической погрешности существенно превышает амплитуду A колебаний случайной составляющей погрешности, требуемое по результатам последовательного анализа количество измерений n является постоянным и не зависит от амплитуды колебаний случайной составляющей погрешности.

2. В случае когда амплитуда A колебаний случайной составляющей погрешности и коэффициент k линейной составляющей систематической погрешности являются малыми величинами одного порядка, количество измерений n — нестабильная величина, причем экстремума можно достичь при равенстве случайных и систематических отклонений.

3. При существенном увеличении доли случайной составляющей погрешности метод последовательного анализа показывает сходимость значений количества измерений n между реальным и случайным процессами.

Заключение. Проведенные исследования показали, что при контроле поверхностей изделий, погрешность при обработке которых определяется преимущественно случайными факторами, необходимое минимальное количество измерений является постоянной величиной, не зависящей от предполагаемой точности измеряемого размера. В инженерной практике такой случай соответствует лезвийной обработке жестких заготовок из ненаполненных термо- и реактопластов. В этом случае износ режущего инструмента является техноло-

гическим, а не размерным, вследствие чего погрешности обработки возникают преимущественно из-за случайных факторов, например вибраций.

В случае когда погрешность обработки вызвана одновременно случайными и систематическими факторами, необходимое минимальное количество измерений есть величина переменная. Для достижения наибольшей точности изготовления и экономической эффективности данную величину следует определять непосредственно в процессе измерений. В инженерной практике такой случай соответствует обработке стальных деталей инструментом из твердого сплава.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шторм Р. *Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества*. Москва, Мир, 1970, 368 с.
- [2] Невельсон М.С. *Автоматическое управление точностью обработки на металлорежущих станках*. Ленинград, Машиностроение, 1982, 184 с.
- [3] Зайцев Г.Н. *Управление качеством. Технологические методы управления качеством изделий*. Санкт-Петербург, Питер, 2014, 266 с.
- [4] Лиморенко А.Д., Шачнев Ю.А. Исследование возможности повышения точности обработки деталей за счет применения алгоритма управления. *Наука и образование*, 2012, № 11. URL: <http://technomag.neicon.ru/doc/483097.html>
- [5] Шачнев Ю.А., Барбашов Н.Н. Выбор эффективных критериев определения объема измерений. *9-я Всерос. науч.-техн. конф. «Состояние и проблемы измерений»*. Сб. материалов. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004, с. 27.
- [6] Барбашов Н.Н., Терентьева А.Д. Управление точностью обработки деталей с применением активного контроля. *Инженерный вестник*, 2015, № 9. URL: <http://engsi.ru/doc/801150.html>
- [7] Барбашов Н.Н., Лопатина А.С., Подчасов Е.О. Повышение точности контроля ответственных деталей машин. *Приводы и компоненты машин*, 2015, № 4–5, с. 14–17.
- [8] Рахматуллин А.И., Моисеев В.С. *Математические модели и методы оптимизации нестационарных систем обслуживания*. Казань, Шк., 2006, 211 с.
- [9] Кузнецов Л.А. Контроль и оценка многомерного качества. *Методы менеджмента качества*, 2008, № 10, с. 40–45.
- [10] Тихонов В.И., Шахтарин Б.И., Сизых В.В. *Случайные процессы. Т. 4. Случайные величины и процессы*. Москва, Радио и связь, 2003, 399 с.
- [11] Ким Д.П. *Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы*. Москва, Физматлит, 2004, 463 с.
- [12] Тайц В.Г., Гуляев В.И. *Технология машиностроения и производство подъемно-транспортных, строительных и дорожных машин*. Москва, Академия, 2007, 364 с.
- [13] Сидняев Н.И. *Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных*. Москва, Юрайт, 2011, 399 с.

Статья поступила в редакцию 21.02.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лиморенко М.Е., Подчасов Е.О. Терентьева А.Д. Повышение точности автоматизированного контроля ответственных изделий. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-6-1626>

Лиморенко Мария Евгеньевна — старший преподаватель кафедры «Инженерная графика» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 3 научных работ и 2 методических пособий в области машиностроительного черчения и машинной графики. e-mail: limorenkome@gmail.com

Подчасов Евгений Олегович — ассистент кафедры «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 8 научных работ в области проектирования приводов и компонентов машин. e-mail: podchacha@yahoo.com

Терентьева Арина Дмитриевна — ассистент кафедры «Теория механизмов и машин» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 14 научных работ в области адаптивного управления для повышения точности. e-mail: terentyevaad@gmail.com

Increase in accuracy of automatic control of vital parts

© М.Е. Limorenko, E.O. Podchasov, A.D. Terenteva

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Increasing the requirements for the accuracy of machine part surfaces is one of the consequences of the development of modern machine building. It leads to complication of intermediate control and acceptance testing, which will reduce the rejection rate. However, increasing the requirements for accuracy can significantly complicate control technology and the requirements for measuring technology. To solve this problem, it is possible to apply multiple measurements with the obligatory condition of optimizing their quantity. The application of the methodology for determining the minimum required number of measurements based on the Student's coefficient, described in the classical literature, is associated with uncertainty. We suggest, in order to overcome these difficulties, applying the method of sequential analysis with the introduction of dimensionless criteria for stabilizing the process. The specified method allows us to reveal the minimum necessary quantity of measurements depending on characteristics of technological process.

Keywords: mechanical engineering, vital parts, accuracy of manufacture and measurement, control, automation, sequential analysis

REFERENCES

- [1] Shtorm R. *Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika. Statisticheskii kontrol kachestva* [Probability theory. Math statistics. Statistical quality control]. Moscow, Mir Publ., 1970, 368 p. [in Russ.].
- [2] Nevelson M.S. *Avtomaticheskoe upravlenie tochnostyu obrabotki na metallorazhushkikh stankah* [Automatic control of machining accuracy]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1982, 184 p.
- [3] Zaytsev G.N. *Upravlenie kachestvom. Tekhnologicheskie metody upravleniya kachestvom izdeliy* [Quality control. Processing methods of product quality control]. St. Petersburg, Piter Publ., 2014, 266 p.
- [4] Limorenko A.D., Shachnev Yu.A. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2012, no. 11. Available at: <http://technomag.neicon.ru/doc/483097.html>
- [5] Shachnev Yu.A., Barbashov N.N. Vibor effektivnykh kriteriev opredeleniya ob'ema izmereniy [Selection criteria for determining the effective measurement volume]. *9-ya Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Sostoyanie i problemy izmereniy». Sbornik materialov* [9th All-Russian Scientific Conference The condition and the measurement problems. Collection of materials]. Moscow, BMSTU Publ., 2004, p. 27.
- [6] Barbashov N.N., Terenteva A.D. *Inzhenernyy vestnik. — Engineering Bulletin*, 2015, no. 9. Available at: <http://engsi.ru/doc/801150.html>
- [7] Barbashov N.N., Lopatina A.S., Podchasov E.O. *Privody i komponenty mashin — Machine drives and parts*, 2015, no. 4–5, pp. 14–17.
- [8] Rahmatullin A.I., Moiseev V.S. *Matematicheskie modeli i metody optimizatsii nestatsionarnykh system obsluzhivanya* [Mathematical models and methods of optimization of non-stationary service systems]. Kazan, Shkola Publ., 2006, 211 p.
- [9] Kuznetsov L.A. *Metody menedzhmenta kachestva — Methods of Quality Management*, 2008, no. 10, pp. 40–45.
- [10] Tikhonov V.I., Shakhtarin B.I., Sizykh V.V. *Sluchaynye protsessy. Tom 4. Sluchaynye velichiny i protsessy* [Stochastic processes. Vol. 4. The random variables and processes]. Moscow, Radio and svyaz Publ., 2003, 399 p.

- [11] Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Tom 2. Mnogomernye, nelineynye, optimalnye i adaptivnye sistemy* [Automatic control theory. Vol. 2. Multi-dimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004, 463 p.
- [12] Tayts V.G., Gulyaev V.I. *Tehnologiya mashinostroeniya i proizvodstvo pod'emno-transportnykh, stroitelnykh i dorozhnykh mashin* [Mechanical engineering technology and manufacture of lift-and-carry, building and road machines]. Moscow, Akademiya Publ., 2007, 364 p.
- [13] Sidnyaev N.I. *Teoriya planirovaniya eksperimenta i analiz statisticheskikh dannykh* [Theory of experimental planning and analysis of statistical data]. Moscow, Urayt Publ., 2011, 399 p.

Limorenko M.E., Senior Lecturer of the Department of Engineering Graphics, Bauman Moscow State Technical University. Author of 3 scientific publications and 2 workbooks in the field of engineering drawing and computer graphics.
e-mail: limorenkome@gmail.com

Podchasov E.O., Assistant Lecturer of the Department of Theory of Mechanisms and Machines, Bauman Moscow State Technical University. Author of 8 publications in the field of drives and machine components design. e-mail: podchacha@yahoo.com

Terenteva A.D., Assistant Lecturer of the Department of Theory of Mechanisms and Machines, Bauman Moscow State Technical University. Author of 14 publications in the field of adaptive control for improving the accuracy. e-mail: terentyevaad@gmail.com