

УДК 517.977.5

Повышение точности обработки методами адаптивного управления

Барбашов Н. Н.¹, Терентьева А. Д.^{1,*}

[*terentyevaad@gmail.com](mailto:terentyevaad@gmail.com)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В процессе обработки деталей под влиянием погрешностей происходит смещение поля рассеивания размеров деталей к границе допуска. Для повышения точности обработки и предотвращения получения брака необходимо уменьшать составляющие погрешности обработки: повышать точность станка и инструмента, стойкость инструмента, жесткость системы, точность настройки. Так же через определенное время необходимо произвести поднастройку станка. Но увеличение количества поднастроек снижает производительность, а повышенные требования к станку и инструменту приводят к значительному повышению стоимости обработки. Поэтому задача формирования рациональных методик контроля, позволяющих обеспечивать как некоторый заданный выходной уровень качества, так и его повышение, остаётся актуальной. В современном производстве в области управления технологическим процессом при помощи средств активного контроля задача повышения точности может быть решена выбором рационального алгоритма управления путем введения 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: статистические методы контроля, активный контроль, управление точностью, рациональный алгоритм, адаптивное управление, скользящая средняя

Введение

Важной задачей современной математической статистики является научная оценка результатов измерений, методы которой опираются на теорию вероятностей. Задача повышения точности в области управления технологическим процессом при помощи средств активного контроля может быть конкретизирована и решена путем выбора рационального алгоритма управления. [1, 2, 3]

Для решения поставленной задачи при активном контроле необходимо разработать методы управления точностью путем введения соответствующих корректировок [4, 5, 6, 7, 8]. Наиболее перспективными представляются методы, основанные на управлении по

скользящей средней, включающие в себя информацию об изменении нескольких последних измеренных значений контролируемого параметра, что позволит улучшить качество продукции и повысить скорость производства. [9, 10, 11, 12]

Отечественные ученые, предлагавшие в своих работах [10, 11, 12] использование систем активного контроля, опирались на классические математические модели. Наибольшего успеха добились в своих работах И.И. Лобунина и М.С. Невельсон. Разработкой оптимального позиционного управления точностью процесса обработки занимался Ю.А. Шачнев [12].

В основе методики управления по скользящей средней, предлагаемой ГОСТ Р ИСО 7870-1-2011, лежит вычисление скользящей средней, когда первые три члена последовательности отклонений остаются неизменными, т.е. $\bar{x}_1 = x_1$, $\bar{x}_2 = x_2$, $\bar{x}_3 = x_3$. Здесь x_i - реализация отклонения на i -м шаге процесса. А далее для каждого i -го члена последовательности отклонения будут вычисляться как $\bar{x}_i = x_i - \bar{x}_i'$, где $\bar{x}_i'$, вычислены как среднее арифметическое трех предыдущих членов, то есть

$$\bar{x}_i' = \frac{x_{i-1} + x_{i-2} + x_{i-3}}{3}$$

[13].

Эффективность линейной формулы $k \cdot \bar{x}_i$ адаптивного управления с введением скользящей средней для конкретных производства, процесса и модели станка показала в своей работе И.И. Лобунина. Здесь $\bar{x}_i$ – также реализация отклонения на i -м шаге процесса, получаемая в программе при помощи случайной функции, удовлетворяющая выбранному закону распределения, при введении k - коэффициента управления. Методика управления остается той же, что предлагается в ГОСТ Р ИСО 7870-1-2011, разница лишь в подсчете отклонения. Для каждого i -го члена последовательности отклонения будут вычисляться как $\bar{x}_i = x_i - k \cdot \bar{x}_i'$ где $\bar{x}_i'$, вычислены как среднее арифметическое трех предыдущих членов.

В качестве критерия оценки эффективности управления взят коэффициент увеличения точности $\psi_T = \frac{\sigma_y}{\sigma}$, представляющий собой отношение среднеквадратического отклонения процесса после введения адаптивного управления к среднеквадратическому отклонению процесса до введения адаптивного управления, предложенный Ю.А. Шачневым. [9, 12] При введении такого коэффициента, увеличение точности определяется критерием $\psi_T < 1$. Для простоты понимания 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 введения адаптивного управления.

Решение задачи состоит в выборе оптимальных в смысле указанного критерия увеличения точности ψ_T значений k , подбираемых таким образом, чтобы критерий ψ_T был минимален, то есть эффективность управления была наибольшей.

Проводить исследование целесообразно на математической модели случайной величины, поскольку вероятностный закон на практике почти всегда неизвестен, на что указывали в своих работах многие ученые [4, 11]. Но в то же время, серия стандартов ГОСТ Р 50779 регламентирует методики управления качеством для конкретных законов распределения. [16, 17, 18]

Для проведения исследования была создана математическая модель процесса измерения детали, с наличием случайной составляющей погрешности. [7, 14] Как показывают исследования [10], несмотря на отсутствие видимых признаков смещения настройки (то есть систематической составляющей), она существует, причем ее доля может составлять более половины суммарной погрешности.

Исследования проводятся при многократных повторяющихся измерениях с целью усреднения получаемых результатов для повышения достоверности выводов. Единичный случай эффективности введенного адаптивного управления не может гарантировать эффективности всех последующих. Кроме того, указанные исследования проводятся при различных объемах измерений, поскольку предлагаемый метод адаптивного управления осуществляется при активном контроле, то есть количество измерений n непрерывно накапливается. А значит, должна быть доказана эффективность введения адаптивного управления при различном количестве измерений.

Данная работа является продолжением исследований, изложенных в работах [14, 15], применяются те же методы, использовано то же программное обеспечение. Все обозначения соответствуют принятым в работе [14].

В работах [14, 15] показано, что введение адаптивного управления в активном контроле с использованием предлагаемой формулы для массива основных отклонений измеряемой величины, распределенной по предлагаемым в серии ГОСТ Р 50779 законам распределения, с полем допуска 30 мкм, дает положительный эффект регулирования. Коэффициент увеличения точности при введении корректировки по формуле $k \cdot \overline{x_i}$ при любом количестве измерений $\psi_T^{\text{формула}} < 1$, что говорит о положительном эффекте регулирования, и с увеличением количества измерений n постепенно возрастает. Кроме того, в работах [14, 15] показано, что корректировка по скользящей средней, рекомендуемая ГОСТ, при любом количестве измерений неэффективна. Результаты этих исследований представлены на рисунке 1.

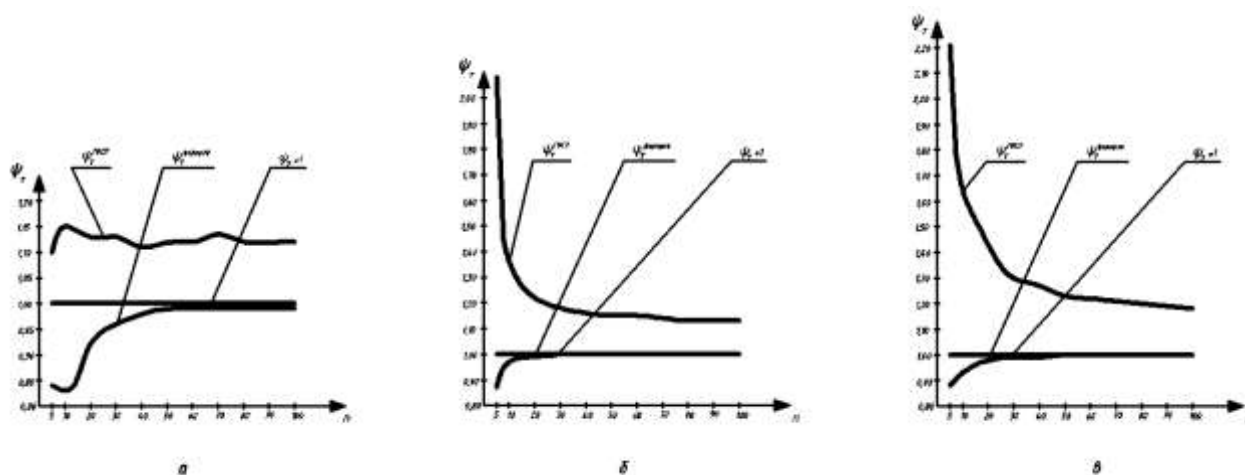


Рис. 1. Сравнение коэффициентов увеличения точности ψ_T при введении корректировки по ГОСТ и по формуле $k \cdot \overline{x_i}$ при многократных измерениях а - для нормального закона распределения, б - для закона распределения Вейбулла, в - для закона распределения Рэлея

Необходимо доказать возможность применения выбранного метода адаптивного управления и его эффективность при различном интервале измерений. Эксперименты при исследовании эффективности для массива основных отклонений измеряемой величины, распределенной по предлагаемым в серии ГОСТ Р 50779 законам распределения, были осуществлены для поля допуска 30 мкм, основное отклонение j_s . Последующий эксперимент с целью исследования эффективности выбранной модели адаптивного управления при различном интервале измерений разделен на два: в первом исследована эффективность при изменении (увеличении и уменьшении) величины поля допуска, а во втором - эффективность при смещении поля допуска постоянной величины относительно нулевой линии.

Данные этих экспериментов представлены в таблицах и графически. В графическом представлении результатов экспериментов есть одно отличие от предыдущего случая. В случае исследования эффективности выбранной модели адаптивного управления для различных законов распределения было два независимых параметра: коэффициент увеличения точности ψ_T и количество измерений n . В случае исследования эффективности выбранной модели адаптивного управления при различном интервале измерений независимых параметров уже три: коэффициент увеличения точности ψ_T , количество измерений n и изменение поля допуска. Поскольку эксперимент по исследованию эффективности выбранного метода адаптивного управления при различном интервале измерений разделен на два, то для первого эксперимента по исследованию эффективности при изменении

величины поля допуска в качестве третьего параметра на диаграмме выбрана ширина поля допуска T , а для второго эксперимента по исследованию эффективности при смещении поля допуска постоянной величины относительно нулевой линии - середина поля допуска

$$\frac{es + ei}{2},$$

для упрощения обозначения этого параметра на диаграмме введено обозначение

$$e_0 = \frac{es + ei}{2}.$$

В эксперименте по исследованию эффективности при изменении величины поля допуска поле допуска варьируется, принимая значения 6; 10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100. В эксперименте по исследованию эффективности при смещении поля допуска постоянной величины относительно нулевой линии положение середины поля допуска варьируется с шагом 15 мкм и принимает значения -60; -45; -30; -15; 0; 15; 30; 45; 60.

Закон распределения нормальный, стандартное отклонение 5.

Результаты измерений с введением корректировок по предлагаемой формуле представлены в таблицах 1 и 2 и на рисунке 2. Результаты измерений с введением корректировок по ГОСТ для сравнения их с результатами введения корректировок по формуле представлены в таблицах 3 и 4 и на рисунке 3. В качестве коэффициента увеличения точности ψ_T представлены средние значения по 100 повторениям.

Таблица 1. Сравнение коэффициентов увеличения точности ψ_T при введении корректировки по формуле

$\overline{k \cdot x_i}$ при изменении величины поля допуска при многократных измерениях.

$\begin{matrix} T \\ n \end{matrix}$	6	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	0,83	0,87	0,85	0,84	0,86	0,84	0,87	0,90	0,88	0,89	0,88
10	0,92	0,90	0,88	0,83	0,87	0,84	0,86	0,90	0,91	0,91	0,91
20	0,98	0,97	0,95	0,92	0,92	0,92	0,91	0,94	0,94	0,94	0,94
30	0,99	0,99	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97	0,96	0,97	0,96
40	1,00	1,00	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99	0,98	0,98
50	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,98	0,99	0,98	0,98	0,99	0,99
60	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
70	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
80	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
90	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
100	1,00	1,00	1,00	0,99	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	1,00

Таблица 2. Сравнение коэффициентов увеличения точности ψ_T при введении корректировки по формуле $k \cdot \overline{x_i}$ при смещении поля допуска постоянной величины при многократных измерениях.

$n \backslash e_0$	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60
5	0,88	0,87	0,90	0,82	0,82	0,86	0,85	0,89	0,87
10	0,96	0,96	0,97	0,94	0,80	0,94	0,95	0,96	0,96
20	0,99	0,99	0,99	0,97	0,84	0,97	0,99	0,98	0,99
30	1,00	1,00	0,98	0,98	0,88	0,98	0,99	0,99	1,00
40	1,00	1,00	0,99	0,99	0,91	0,99	0,99	1,00	1,00
50	1,00	1,00	1,00	0,99	0,94	0,99	0,99	1,00	1,00
60	1,00	1,00	0,99	0,99	0,96	0,99	1,00	1,00	1,00
70	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97	0,99	1,00	1,00	1,00
80	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00
90	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00
100	1,00	1,00	1,00	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00

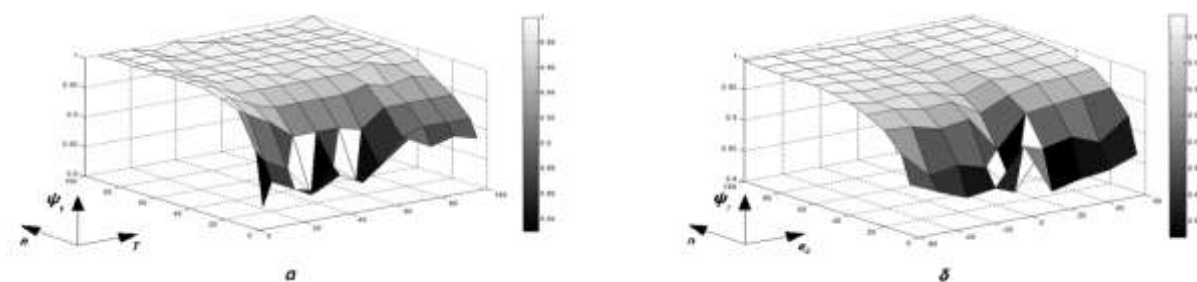


Рис. 2. Сравнение коэффициентов увеличения точности ψ_T при введении корректировки по формуле $k \cdot \overline{x_i}$ при а - изменении величины поля допуска при многократных измерениях б - смещении поля допуска постоянной величины при многократных измерениях

Таблица 3. Сравнение коэффициентов увеличения точности ψ_T при введении корректировки по ГОСТ при изменении величины поля допуска при многократных измерениях.

$n \backslash T$	6	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
5	1,14	1,09	1,13	1,11	1,10	1,12	1,13	1,13	1,13	1,15	1,13
10	1,13	1,10	1,12	1,15	1,11	1,13	1,13	1,12	1,12	1,11	1,13
20	1,10	1,13	1,13	1,13	1,11	1,11	1,13	1,13	1,13	1,11	1,12
30	1,13	1,12	1,11	1,13	1,13	1,13	1,11	1,12	1,13	1,13	1,12
40	1,12	1,11	1,12	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,11	1,12	1,12
50	1,11	1,13	1,12	1,12	1,11	1,12	1,11	1,13	1,12	1,11	1,12
60	1,12	1,12	1,12	1,12	1,11	1,12	1,13	1,11	1,12	1,13	1,12
70	1,12	1,12	1,13	1,13	1,11	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
80	1,12	1,12	1,12	1,12	1,11	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,11
90	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,13	1,13	1,12	1,13	1,12
100	1,13	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,11	1,12	1,11

Таблица 4. Сравнение коэффициентов увеличения точности ψ_T при введении корректировки по ГОСТ при смещении поля допуска постоянной величины при многократных измерениях.

$n \backslash e_0$	-60	-45	-30	-15	0	15	30	45	60
5	7,00	7,06	3,96	2,01	1,13	2,17	3,49	4,89	7,06
10	4,50	4,25	2,65	1,50	1,13	1,53	2,55	3,46	4,25
20	3,13	3,07	1,86	1,32	1,12	1,40	1,89	2,44	3,07
30	2,65	2,57	1,71	1,24	1,12	1,29	1,62	2,11	2,57
40	1,70	2,33	1,55	1,22	1,12	1,24	1,50	1,91	2,33
50	1,70	3,95	1,46	1,19	1,13	1,23	1,44	1,75	2,11
60	1,70	1,96	1,40	1,18	1,12	1,20	1,39	1,67	1,96
70	1,70	1,87	1,38	1,17	1,11	1,18	1,33	1,60	1,87
80	1,70	1,80	1,34	1,17	1,12	1,18	1,33	1,57	1,80
90	1,70	1,74	1,32	1,16	1,11	1,16	1,30	1,49	1,74
100	1,70	2,84	1,29	1,16	1,12	1,17	1,30	1,47	1,69

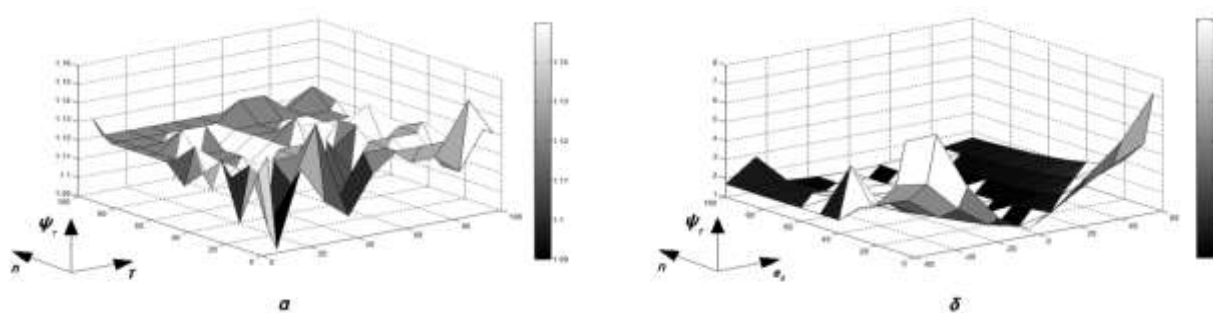


Рис. 3. Сравнение коэффициентов увеличения точности ψ_T при введении корректировки по ГОСТ при а - изменении величины поля допуска при многократных измерениях б - смещении поля допуска постоянной величины при многократных измерениях

Заключение

Из построенных поверхностей, а также из соответствующих таблиц, видно, что и при изменении величины поля допуска, и при смещении поля допуска постоянной величины, корректировка, предлагаемая в действующих ГОСТ, дает отрицательный эффект в смысле выбранного коэффициента увеличения точности, который в случае изменения величины поля допуска лучше полученного при смещении поля допуска постоянной величины, но по-прежнему остается отрицательным.

Одновременно с тем можно заметить, что введение корректировок по предложенной формуле в целом дает положительный эффект, изредка достигая нулевого эффекта адаптивного управления при коэффициенте увеличения точности $\psi_T = 1$, не ухудшая процесс.

Общая картина при поле допуска разной величины остается той же, что и для единичного случая при исследовании эффективности выбранной модели адаптивного управления для различных законов распределения: ощутимый положительный эффект регули-

рования в смысле коэффициента увеличения точности при введении корректировки по формуле $\psi_T^{\text{формула}} < 1$ достигается при небольшом количестве измерений (в среднем до $n = 30$) и с увеличением количества измерений постепенно возрастает, достигая $\psi_T = 1$. Наименьших значений коэффициент увеличения точности ψ_T достигает при $n = 10$, принимая значения в среднем $\psi_T^{\text{формула}} = 0,8...0,9$, что говорит об улучшении на $\Delta = 10...20\%$, а в отдельных случаях достигает значений $\psi_T^{\text{формула}} = 0,46$ и $\Delta = 54\%$.

Результаты проведенных экспериментов позволили сделать следующие выводы:

1. Введение корректировок по скользящей средней, рекомендуемых для любого закона распределения, регламентируемого серией стандартов ГОСТ Р 50779, неэффективно при любом количестве измерений. Поскольку предлагаемая в ГОСТ методика управления по скользящей средней не предусматривает возможности введения нулевого смещения настройки ни на каком шаге управления, а значит процесс можно ухудшить. Тогда как наличие в предлагаемой формуле коэффициента k позволяет на любом шаге управления ввести нулевое смещение настройки, если улучшение невозможно.
2. Введение корректировок по предложенной формуле в целом дает положительный эффект, изредка достигая нулевого эффекта адаптивного управления при коэффициенте увеличения точности $\psi_T = 1$, не ухудшая процесс производства. Предлагаемый метод адаптивного управления при многократных повторяющихся измерениях дает улучшение в среднем на $\Delta = 10...20\%$, а в отдельных случаях единичных экспериментов достигает значений $\Delta = 54\%$.

Список литературы

1. Филонов И.П., Медведев А.И. Вероятностно-статистические методы оценки качества в машиностроении: учеб. пособие для вузов. Минск: Тесей, 2000. 127 с.
2. Шишмарев В.Ю. Технические измерения и приборы: учебник для вузов. 2-е изд., испр. М.: Академия, 2012. 383 с.
3. Шторм Р. Теория вероятностей. Математическая статистика. Статистический контроль качества. М.: Мир, 1970. 368 с.
4. Зайцев Г.Н. Управление качеством. Технологические методы управления качеством изделий: учеб. пособие для вузов. СПб.: Питер, 2014. 266 с.
5. Ким Д.П. Теория автоматического управления: учеб. пособие для вузов. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: Физматлит, 2004. 463 с.
6. Мельников В.П., Смоленцев В.П., Схиртладзе А.Г. Управление качеством: учебник для вузов / ред. Мельников В.П. 3-е изд., стер. М.: Академия, 2007. 345 с.
7. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 548 с.

8. Рубан А.И. Методы анализа данных: учеб. Пособие. 2-е изд., испр. и доп. Красноярск: Изд-во КГТУ, 2004. 319 с.
9. Лиморенко А.Д., Шачнев Ю.А. Исследование возможности повышения точности обработки деталей за счет применения алгоритма управления // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 11. С. 273-300. DOI: [10.7463/1112.0483097](https://doi.org/10.7463/1112.0483097)
10. 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. Л.: Сев-Зап. Политехн. ин-т, 1970. 17 с.
11. Невельсон М.С. Автоматическое управление точностью обработки на металлорежущих станках. Л.: Машиностроение, 1982. 184 с.
12. Шачнев Ю.А. Оптимальное позиционное управление точностью процесса обработки // Труды МВТУ №369. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения. М.: Типография МВТУ, 1981. С. 98-115.
13. ГОСТ Р ИСО 7870-1-2011 Статистические методы. Контрольные карты. Часть 1. Общие принципы. М.: Стандартиформ, 2012. 15 с.
14. Барбашов Н.Н., Терентьева А.Д. Управление точностью обработки деталей с применением активного контроля // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 09. С. 526-531. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/801150.html> (дата обращения 13.01.2016).
15. Барбашов Н.Н., Терентьева А.Д. Применение активного контроля для повышения точности обработки // Инженерный вестник. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 10. С. 501-506. Режим доступа: <http://engbul.bmstu.ru/doc/814701.html> (дата обращения 13.01.2016).
16. ГОСТ Р 50779.21-2004 Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Часть 1. Нормальное распределение. М.: Госстандарт России, 2004. 47 с.
17. ГОСТ Р 50779.27-2007 (МЭК 61649:1997) Статистические методы. Критерий согласия и доверительные интервалы для распределения Вейбулла. Стандартиформ, 2008. 16 с.
18. ГОСТ Р ИСО 21747-2010 Статистические методы. Статистики пригодности и воспроизводимости процесса для количественных характеристик качества. М.: Стандартиформ, 2012. 28 с.

Improving Accuracy of Processing by Adaptive Control Techniques

N.N. Barbashov¹, A.D. Terentieva^{1,*}

[*terentyevaad@gmail.com](mailto:terentyevaad@gmail.com)

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: statistical methods of control, active control, precision control, moving average, rational algorithm

When machining the work-pieces a range of scatter of the work-piece dimensions to the tolerance limit is displaced in response to the errors. To improve an accuracy of machining and prevent products from defects it is necessary to diminish the machining error components, i.e. to improve the accuracy of machine tool, tool life, rigidity of the system, accuracy of adjustment. It is also necessary to provide on-machine adjustment after a certain time. However, increasing number of readjustments reduces the performance and high machine and tool requirements lead to a significant increase in the machining cost.

To improve the accuracy and machining rate, various devices of active control (in-process gaging devices), as well as controlled machining through adaptive systems for a technological process control now become widely used. Thus, the accuracy improvement in this case is reached by compensation of a majority of technological errors. The sensors of active control can provide improving the accuracy of processing by one or two quality classes, and simultaneous operation of several machines.

For efficient use of sensors of active control it is necessary to develop the accuracy control methods by means of introducing the appropriate adjustments to solve this problem. Methods based on the moving average, appear to be the most promising for accuracy control, since they contain information on the change in the last several measured values of the parameter under control.

When using the proposed method in calculation, the first three members of the sequence of deviations remain unchanged, therefore $\bar{x}_1 = x_1$, $\bar{x}_2 = x_2$, $\bar{x}_3 = x_3$. Then, for each i -th member of the sequence we calculate that way: $\bar{x}_i = x_i - k, \bar{x}_i'$, where instead of the $\bar{x}_i$ values will be populated with the corresponding values x_i' calculated as an average of three previous members:

$$x_i' = \frac{x_{i-1} + x_{i-2} + x_{i-3}}{3}.$$

As a criterion for the estimate of the control effectiveness is taken an improving accuracy coefficient

$$\psi_T = \frac{\sigma_y}{\sigma}.$$

Then a mathematical model of the work-piece measurement process was made with available random component of the error and multiple measurements with 100 repeats were taken. And there was a comparison of the correction for the Standard and the proposed method, from which we can conclude the following: when changing a value of the tolerance range, and with displacement of the tolerance range of the constant value, the adjustment proposed in the existing Standard, gives a negative effect in terms of the selected magnification of accuracy, which in the case of changing value of the tolerance range is the best obtained with shifting the tolerance of the constant value, but, as before, remains negative.

At the same time it can be seen that the introduction of adjustments according to the proposed formula, as a whole, has a positive effect, occasionally reaching a zero effect of the adaptive control at magnifications of accuracy $\psi_T = 1$ without making a process worse.

References

1. Filonov I.P., Medvedev A.I. *Veroyatnostno-statisticheskie metody otsenki kachestva v mashinostroenii* [Probabilistic and statistical methods for quality assessment in engineering]. Minsk: Tesey Publ., 2000. 127 p. (in Russian).
2. Shishmarev V.Yu. *Tekhnicheskie izmereniya i pribory* [Performance measurement and instrumentation]. Moscow, Akademiya Publ., 2012. 383 p. (in Russian).
3. Shtorm R. *Teoriya veroyatnostey. Matematicheskaya statistika. Statisticheskii kontrol' kachestva* [Probability theory. Math statistics. Statistical quality control]. Moscow, Mir Publ., 1970. 368 p. (in Russian).
4. Zaytsev G.N. *Upravlenie kachestvom. Tekhnologicheskie metody upravleniya kachestvom izdeliy* [Quality control. Technological methods for products quality control]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2014. 266 p. (in Russian).
5. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 2. Mnogomernye, nelineynye, optimal'nye i adaptivnye sistemy* [Automatic control theory. Vol. 2. Multi-dimensional, nonlinear, optimal and adaptive systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004. 463 p. (in Russian).
6. Mel'nikov V.P., Smolentsev V.P., Skhirtladze A.G. *Upravlenie kachestvom* [Quality management]. Moscow, Akademiya Publ., 2007. 345 p. (in Russian).
7. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelineynoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [The nonlinear and adaptive control on complex dynamic systems]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 2000. 548 p. (in Russian).
8. Ruban A.I. *Metody analiza dannykh* [Data analysis methods]. Krasnoyarsk, KGTU Publ., 2004. 319 p. (in Russian).
9. Limorenko A.D., Shachnev Yu.A. Investigating the possibility of improving precision of part processing by using control algorithm. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E.*

Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU, 2012, no. 11, pp. 273-300. (in Russian). DOI: [10.7463/1112.0483097](https://doi.org/10.7463/1112.0483097)

10. Lobunina I.I. *Razrabotka i issledovanie korrelyatsionnykh metodov analiza i povysheniya tochnosti obrabotki na shlifoval'nykh stankakh s priborami aktivnogo kontrolya: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk.* [Development and research on correlation analysis methods and improving processing accuracy for grinding machines with active control devices: cand. tech. sci. diss.]. Leningrad, SZPI Publ., 1970. 17 p. (in Russian).
11. Nevel'son M.S. *Avtomaticheskoe upravlenie tochnost'yu obrabotki na metallorezhushchikh stankakh* [Automatic control on processing accuracy for metal-cutting machines]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1982. 184 p. (in Russian).
12. Shachnev Yu.A. [Optimum positional control of processing accuracy.] *Trudy MVTU №369 "Vzaimozamenyaemost', standartizatsiya i tekhnicheskie izmereniya"* [Proc. of the Bauman MSTU "Interchangeability, standardization and engineering measurements"]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1981, pp. 98-115. (in Russian).
13. GOST R ISO 7870-1-2011 *Statisticheskie metody. Kontrol'nye karty. Chast' 1. Obshchie printsipy.* [Statistical methods. Control charts. P. 1. General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 15 p. (in Russian).
14. Barbashov N.N., Terent'yeva A.D. Active control of parts processing accuracy. *Inzhenernyy vestnik MGTU im. N.E. Baumana = Electronic publishing engineering bulletin*, 2015, no. 9. Pp. 526-531. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/801150.html> (accessed 13.01.2016). (in Russian).
15. Barbashov N.N., Terent'yeva A.D. Using active control for improving processing accuracy. *Inzhenernyy vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. zhurn. = Electronic publishing engineering bulletin*, 2015, no. 10, pp. 501-506. Available at: <http://engbul.bmstu.ru/doc/814701.html> (accessed 13.01.2016). (in Russian).
16. GOST R 50779.21-2004 *Statisticheskie metody. Pravila opredeleniya i metody rascheta statisticheskikh kharakteristik po vyborochnym dannym. Chast' 1. Normal'noe raspredelenie* [Statistical methods. Statistical characteristics definitions rules and calculating methods using sample data. Part 1. Normal distribution]. Moscow, Gosstandart Rossii Publ., 2004. 47 p. (in Russian).
17. GOST R 50779.27-2007 (MEK 61649:1997). *Statisticheskie metody. Kriteriy soglasiya i doveritel'nye intervaly dlya raspredeleniya Veybulla.* [Statistical methods. Fitting criteria and confidence intervals for Weibull distribution]. Moscow, Standartinform Publ., 2008. 16 p. (in Russian).
18. GOST R ISO 21747-2010 *Statisticheskie metody. Statistiki prigodnosti i vosproizvodimosti protsessa dlya kolichestvennykh kharakteristik kachestva.* [Statistical methods. Applicability and reproducibility statistics for quality numbers]. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 28 p. (in Russian).