

Статистическое управление процессами на основе контроля по суженному допуску. Сравнительное исследование методов регулирования уровня настройки

Д.А. Мастеренко,
проф. каф. «Изм. инф. сист. и технол.», д.т.н., metrologycenter@gmail.com,
МГТУ «Станкин», г. Москва

Кратко рассмотрены предложения российских и зарубежных авторов по использованию суженных и ступенчатых калибров для слежения за состоянием производственного процесса. Выполнено сравнительное исследование методов управления процессами на основе полученных результатов выборочного контроля по суженному допуску. Результаты численного моделирования показывают, что более высокую точность изделий, по сравнению с ранее предложенным методом, обеспечивает формирование корректирующего воздействия на основе оценок типа Питмена параметров процесса.

The proposals of using narrow and step gauges for the process monitoring purposes made by Russian and foreign authors are briefly viewed. The comparative research of the process control methods based on the results of a narrow-limit gauge sampling was fulfilled. The numerical simulation results show that forming of the correction on the base of Pittman-type estimates of the process parameters ensures higher precision of produced articles in comparison with the previously proposed method.

Развитие концепции качества на протяжении последних десятилетий привело к пониманию того, что основное внимание в деятельности по обеспечению качества должно уделяться не контролю готовой продукции, а организации производственных процессов. Работа по повышению качества также должна включать в себя мероприятия по постоянному совершенствованию всех процессов. Любой производственный процесс требуется организовать таким образом, чтобы его выходная величина – значение определенного показателя качества изделия – не просто укладывалась в заданный допуск, а максимально приближалась к целевому значению.

С учетом присущей процессам variability, носящей случайный характер, приближение показателя качества к целевому значению складывается из двух составляющих: снижения variability, которая может быть выражена дисперсией или среднеквадратическим отклонением σ , и регулирования уровня настройки, то есть среднего значения показателя качества μ , и приближения его к целевому значению μ_0 [1,2]. Распределение вероятностей в крупносерийном и массовом производстве часто может быть принято нормальным.

Контрольные операции в ходе процесса могут оставаться, но им предназначается роль слежения за состоянием процесса, чтобы не допускать изготовления несоответствующей продукции, а не отфильтровывать её при приёмочном контроле.

Значительную часть показателей качества в машиностроении составляют размерные параметры деталей. Для проверки нахождения размера в поле допуска часто применяется пара калибров «проходной – непроходной» или совмещённый калибр, позволяющий определить выход размера как за нижнюю, так и за верхнюю границы поля допуска. При приёмочном контроле по альтернативному признаку (когда изделия классифицируют на годные и негодные) обычно пользуются калибрами, размеры которых соответствуют исходному полю допуска, заданному в рабочих чертежах и/или технологических картах. Однако для контроля в процессе производства, осуществляемому с целью управления, это слишком грубый метод.

Наиболее точным является так называемый контроль по количественному признаку, предусматривающий выборочное измерение значений показателя качества изготавливаемых изделий. По измеренным значениям легко оценить значения параметров процесса μ и σ , и на основе полученных оценок, в случае необходимости, планировать и осуществлять управляющие воздействия. Однако измерения требуют более высоких затрат как на оборудование, так и на персонал. Кроме того, производительность измерительных операций ниже, чем контрольных операций при помощи калибров. Поэтому единственной возможностью остаётся управление процессом на базе той или иной разновидности контроля по альтернативному признаку.

Выходом из указанного противоречия может служить контроль при помощи калибров, размеры которых настроены на суженный, по сравнению с заданными спецификациями, допуск.

Предложения использовать калибры для управления процессами появились ещё в 40-е годы XX века [3,4]. К 50-м годам относятся предложения по применению калибров с суженными пределами [5,6]. Предлагалось также использовать ступенчатые калибры [7,8] с построением контрольных карт по результатам классификации изделий из выборки по размерным группам. Заметим, что ступенчатый калибр является промежуточной ступенью на пути к контролю по количественному признаку со всеми как положительными, так и отрицательными последствиями. В частности, требования по точности изготовления таких калибров, а следовательно, и их стоимость, будут выше, чем для обычной пары калибров «проходной – непроходной».

В наши дни продолжают исследования в данном направлении с целью поиска оптимальных параметров калибров с суженными пределами [9].

Среди отечественных публикаций в данном направлении отметим [10,11,12]. В дальнейшем в России задачи контроля по суженному допуску применительно к управлению процессами рассматривали, в основном, представители нижегородской школы менеджмента качества [13,14,15,16].

Приведённый ниже рисунок иллюстрирует принцип контроля по суженному допуску. Через **A** и **B** обозначены, соответственно, нижняя и верхняя границы исходного поля допуска, **a** и **b** – границы суженного поля допуска. Це-

левое значение уровня настройки процесса, равно $\mu_0 = (A + B) / 2 = (a + b) / 2$. Среднеквадратическое отклонение процесса в нормальном состоянии равно σ_0 . Плотность распределения показателя качества изделий, формируемого в процессе, $f(x; \mu, \sigma)$, зависит от μ и σ как от параметров. И в нормальном состоянии процесса, и при небольших отклонениях от него вероятность выхода за границы поля допуска A и B незначительна.

При контроле выборки изделий объемом n единиц по суженным границам a и b подсчитываются количества n_1 и n_3 изделий, у которых значение показателя качества оказывается, соответственно, меньше нижней границы и больше верхней границы суженного поля допуска. Количество изделий, соответствующих суженному полю допуска, составляет n_2 . При этом, конечно, $n = n_1 + n_2 + n_3$. Рост модуля разности $n_1 - n_3$ будет свидетельствовать о смещении уровня настройки, что может быть скорректировано управляющим воздействием без остановки процесса. Рост суммы $n_1 + n_3$ сигнализирует об увеличении вариабельности процесса, что может требовать вмешательства и даже остановки процесса до выяснения и устранения причин.

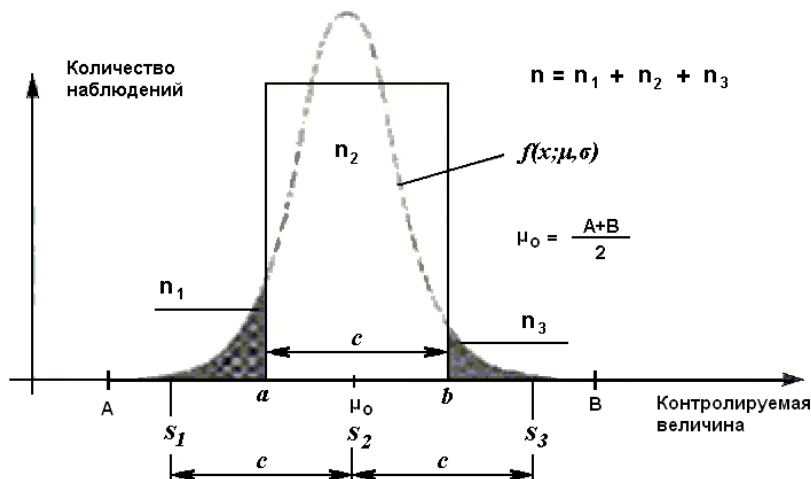


рис. Принцип контроля по альтернативному признаку по суженному допуску. Пояснения в тексте

Важно не только отследить выход процесса из нормального состояния, но и вернуть его обратно при помощи соответствующего управляющего воздействия. В частности, в ситуации, изображённой на рисунке, процесс в целом находится в приемлемом состоянии и обеспечивает очень низкий уровень несоответствий (вероятность выхода за границы исходного поля допуска исчезающе мала). Однако превышение n_1 над n_3 свидетельствует о том, что уровень настройки μ сместился ниже номинального значения μ_0 . При некоторой критической разности $n_1 - n_3$ должен быть дан сигнал о том, что должна быть проведена подналадка процесса для возвращения уровня настройки к значению μ_0 .

В работах [14, 15] предложено наблюдение за состоянием процесса при помощи так называемой «штриховой контрольной карты», настроенной на срабатывание при отклонении уровня настройки от номинала не менее чем на σ_0 . При обнаружении такого отклонения предлагается производить подналадку на то же значение σ_0 . Пример «штриховой карты» приведен в таблице.

Таблица

Пример штриховой контрольной карты для управления процессом

Время	n_1	n_3	$n_1 + n_3$	Результат	Коррекция
8:00	//	/	3	норма	
8:15	///	/	4	норма	
8:30	/	//	3	норма	
8:45	/	//	3	норма	
9:00	-	////	4	сдвиг вправо	$-\sigma_0$
9:15 и т.д.	//	//	4	норма	

Однако, разумно ожидать лучших результатов, если управляющее воздействие основывается на оценках его параметров. Эти оценки могут быть получены по результатам контроля, то есть набору чисел (n_1, n_2, n_3) . Такие оценки, с опорой на [10, 11], приведены в справочнике [12] («метод калибров распределений»), где рассматривается фиксированное сужение поля допуска в два раза. Они получаются путём приравнивая вероятности выхода значения признака качества за нижнюю и верхнюю границу суженного поля допуска их наблюдаемым частотам, то есть, соответственно, n_1 / n и n_3 / n . Если распределение считается нормальным, то получается система уравнений:

$$\frac{n_1}{n} = \Phi\left(\frac{a - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right) \quad (1)$$

$$\frac{n_3}{n} = 1 - \Phi\left(\frac{b - \hat{\mu}}{\hat{\sigma}}\right) \quad (2)$$

где Φ – функция стандартного нормального распределения.

Как другой вариант оценки, вычисляемой по тем же данным, упомянем оценку центра распределения В.Г. Григоревича, Н.О. Козловой, С.В. Юдина [17,18]. Хотя указанными авторами данная оценка была получена с использованием аппарата теории информации с дальнейшей линейризацией в окрестности малых отклонений от номинала, она является следствием применения метода моментов, то есть тех же самых выражений (1), (2).

Автором настоящего доклада предложены и исследованы оценки параметров распределений по группированным выборкам, оптимальные в смысле среднего квадрата погрешности оценивания или другой функции потерь. Основной целью исследований при этом было повышение точности измерений, когда группировка является следствием недостаточной малости дискреты отсчета средства измерения. Отсюда название разработанных методов – методы статистического оценивания по сильно дискретизованным наблюдениям [19,20,21,22,23]. Разработанные оценки могут быть применены и в ситуации группировки наблюдений, характерной для суженных или ступенчатых калибров.

Чтобы воспользоваться методами оценивания параметров по сильно дискретизованным наблюдениям, требуется записать вероятности того, что при заданных значениях уровня настройки μ и среднеквадратического отклонения случайного разброса σ в выборке объема n количества изделий ниже нижней границы, в пределах и выше верхней границы поля допуска будут равны n_1 , n_2 и n_3 :

$$p_1(\mu, \sigma) = P(X < a | \mu, \sigma) = \Phi\left(\frac{a - \mu}{\sigma}\right),$$

$$p_2(\mu, \sigma) = P(a \leq X < b | \mu, \sigma) = \Phi\left(\frac{b - \mu}{\sigma}\right) - \Phi\left(\frac{a - \mu}{\sigma}\right),$$

$$p_3(\mu, \sigma) = P(X \geq b | \mu, \sigma) = 1 - \Phi\left(\frac{b - \mu}{\sigma}\right).$$

Совместная вероятность получения значений (n_1, n_2, n_3) подчиняется полиномиальному распределению:

$$p(n_1, n_2, n_3; \mu, \sigma) = \frac{n!}{n_1! n_2! n_3!} p_1^{n_1}(\mu, \sigma) p_2^{n_2}(\mu, \sigma) p_3^{n_3}(\mu, \sigma). \quad (3)$$

В упомянутых работах автора показано, что для параметров μ и σ оптимальными в смысле усреднённого (байесовского) среднеквадратического риска являются следующие оценки:

$$\hat{\mu} = \frac{\int_M \mu p_1^{n_1}(\mu, \sigma) p_2^{n_2}(\mu, \sigma) p_3^{n_3}(\mu, \sigma) d\mu d\sigma}{\int_M p_1^{n_1}(\mu, \sigma) p_2^{n_2}(\mu, \sigma) p_3^{n_3}(\mu, \sigma) d\mu d\sigma}, \quad (4)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\int_M \frac{1}{\sigma} p_1^{n_1}(\mu, \sigma) p_2^{n_2}(\mu, \sigma) p_3^{n_3}(\mu, \sigma) d\mu d\sigma}{\int_M \frac{1}{\sigma^2} p_1^{n_1}(\mu, \sigma) p_2^{n_2}(\mu, \sigma) p_3^{n_3}(\mu, \sigma) d\mu d\sigma}, \quad (5)$$

названные автором оценками типа Питмена. Эти оценки применимы и в тех случаях, когда $n_1 = 0$ или $n_3 = 0$, и система уравнений (1), (2) теряет однозначную разрешимость.

Множество M , по которому производится интегрирование, представляет собой прямоугольник, стороны которого равны интервалам возможных значений μ и σ . Полагая, что процесс не сильно удалился от нормального состояния, можно выбрать для μ интервал $(a; b)$, а для σ – $(\sigma_0; 2\sigma_0)$.

Некоторое неудобство доставляет сложность вычисления оценок по формулам (4) и (5). На самом деле, произвести вычисления в процессе контроля не требуется. Вместо этого для определенного плана контроля и соответствующего ему объема выборки n , надо табулировать значения оценок для всевозможных сочетаний n_1 , n_2 и n_3 , которые могут иметь место для такого объема.

Полученные оценки могут использоваться при проведении подналадки процесса в случае срабатывания контрольных карт, предложенных в [14,15], или в результате обнаружения отклонений по самим значениям оценок [24,25]. Оптимальное значение корректирующего воздействия по возврату уровня настройки к середине поля допуска равно $\mu_0 - \hat{\mu}$.

Для сравнения точности регулирования процессов методами штриховой контрольной карты и оценок типа Питмена было проведено модельное исследование. Создавались реализации процесса длительностью 10000 со статистически независимыми значениями, смещение уровня настройки которого на старте равно нулю, а дальше нарастает по линейному закону, то есть на каждое очередное изделие прибавляется одна и та же величина $\Delta\mu$.

Выборки изделий (с оптимальным для штриховой карты объемом 42 [14]) брались через различное число изделий («шаг коррекции»). По результатам статистической обработки выборки вычислялось значение корректирующего

воздействия обоими методами. Для сравнения вычислялось также выборочное среднее, но корректирующее воздействие вырабатывалось лишь тогда, когда $|\mu_0 - \bar{x}|$ становилось больше, чем σ_0 / \sqrt{n} .

Моделировалось достаточно медленное изменение уровня настройки с $\Delta\mu = (0,5..4,0) \cdot 10^{-3} \sigma_0$, чтобы в пределах выборки указанного объема оно было незначительным, и уровень настройки можно было считать постоянным.

Для реализаций процесса с каждым видом управления вычислялись средние квадраты отклонений показателя качества от номинального значения. Наконец, производилось усреднение по 100 реализациям каждого процесса с одинаковыми значениями $\Delta\mu$ и шага коррекции. Относительная точность методов регулирования определялась как обратное отношение средних квадратов отклонений показателя качества, полученных при этих методах.

В результате проведенных исследований обнаружено, что относительная точность по отношению к методу «штриховой карты» изменяется следующим образом:

при $\Delta\mu = 0,5 \cdot 10^{-3} \sigma_0$ от 1,11 при шаге коррекции 100 до 1,18 при шаге коррекции 1000 для регулирования по выборочному среднему, от 1,04 при шаге коррекции 100 до 1,14 при шаге коррекции 1000 для регулирования по оценкам типа Питмена;

при $\Delta\mu = 1,0 \cdot 10^{-3} \sigma_0$ от 1,11 при шаге коррекции 100 до 1,21 при шаге коррекции 700 для регулирования по выборочному среднему, от 1,04 при шаге коррекции 100 до 1,15 при шаге коррекции 700 для регулирования по оценкам типа Питмена;

при $\Delta\mu = 2,0 \cdot 10^{-3} \sigma_0$ от 1,13 при шаге коррекции 100 до 8,70 при шаге коррекции 700 для регулирования по выборочному среднему, от 1,06 при шаге коррекции 100 до 8,01 при шаге коррекции 700 для регулирования по оценкам типа Питмена;

при $\Delta\mu = 3,0 \cdot 10^{-3} \sigma_0$ от 1,15 при шаге коррекции 100 до 7,76 при шаге коррекции 400 для регулирования по выборочному среднему, от 1,09 при шаге коррекции 100 до 7,26 при шаге коррекции 400 для регулирования по оценкам типа Питмена;

при $\Delta\mu = 4,0 \cdot 10^{-3} \sigma_0$ от 1,17 при шаге коррекции 100 до 12,46 при шаге коррекции 300 для регулирования по выборочному среднему, от 1,12 при шаге коррекции 100 до 11,59 при шаге коррекции 300 для регулирования по оценкам типа Питмена.

При значениях шага коррекции, больше вышеуказанных, относительная точность метода «штриховой карты» резко ухудшается, что естественно, поскольку «штриховая карта» на отклонения уровня настройки более чем на σ_0 не рассчитана.

Полная таблица с результатами исследований здесь не приводится ввиду ограничений по объему доклада. Её можно найти в статье [26].

Итак, можно сделать вывод о том, что метод регулирования уровня настройки на основе оценок параметров процесса типа Питмена позволяет обеспечивать точность процесса, лучшую, чем при использовании «штриховой контрольной карты». При этом есть некоторый проигрыш в точности относительно управления по количественному признаку (по выборочному среднему), однако не требуется точное измерение показателя качества изготавливаемых изделий, что позволяет снизить стоимость и повысить производительность контрольных операций.

Литература

1. Статистические методы повышения качества / Под ред. Х. Кумэ / Пер. с англ. М.: Финансы и статистика, 1990.
2. Миттаг Х.Й., Ринне Х. Статистические методы обеспечения качества/Пер. с нем. Е.В. Кокот; под ред. Б.Н.Маркова. М.: Машиностроение, 1995. 602 с.
3. Tippet L.H.C. The Efficient Use of Gauges in Quality Control // Engineer. 1944. Vol. 177. pp. 481-483.
4. Tippet L.H.C. Technological application of statistics. N.J.: McGraw-Hill, 1950.
5. Mace A.E. The use of limit gages in process control // Industrial Quality Control. 1952. Vol. 8. No. 4. pp. 24-31.
6. Ott E.R., Mundel A.B. Narrow-Limit Gaging // Industrial Quality Control. 1954. No. March. pp. 21-28.
7. Steiner S.H., Geyer P.L., and Wesolowsky G.O. Control charts based on grouped observations // International Journal of Production Research. 1994. Vol. 32. No. 1. pp. 75-91.
8. Steiner S.H., Geyer P.L., and Wesolowsky G.O. Shewhart control charts to detect mean and standard deviation shifts based on grouped data // Quality and Reliability Engineering International. 1996. Vol. 12. No. 5. pp. 345-353.
9. Aparisi F., Epprecht E.K., and Mosquera J. Statistical Process Control Based on Optimum Gages // Qual. Reliab. Engng. Int. 2017. pp. Published online doi:10.1002/qre.2135.
10. Гостев В.Н., Модель Г.А., Файн Ф.А. Статистический контроль методом группировки (метод калибров распределения). Л.: ЛДНТП, 1949. 37 с.
11. Егудин Г.И. Оценка параметров нормального распределения методом группировки. Л.: ЛДНТП, 1950.
12. Фридлендер И.Г., Жученко Э.И. Управляющий контроль качества продукции на рабочих местах: Справочник. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 118 с.
13. Розно М.И. Статистический контроль качества продукции по альтернативному признаку при изменённом допуске (метод АКУД) // Надёжность и контроль качества. 1992. № 2. С. 44 - 52.
14. Розно М.И. Регулирование процессов на основе данных по альтернативному признаку по суженному допуску. // Методы менеджмента качества. 2001. № 12. С. 27-33.
15. Розно М.И., Соколов Л.А., Мельников А.Ф., Морозов В.В., Резник А.М. Простой способ регулирования технологических процессов с использованием "суженных калибров" // Электроника и электрооборудование транспорта. 2004. № 6. С. 29 - 34.
16. Соколов Л.А. Совершенствование изделий автотракторного электрооборудования по результатам диагностирования дефектов в процессе производства и эксплуатации./Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. М.: МАДИ, 2010.

17. Григорович В.Г., Козлова Н.О., Юдин С.В. Метод оценки центра группирования размеров в условиях производства на АРЛ // Автоматизация технологических процессов в машиностроении. Волгоградский государственный технический университет. 1995. С. 197 - 202.
18. Юдин С.В. Информационно-статистические методы управления качеством продукции массового производства./Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Тула: ТулГУ, 1999.
19. Мастеренко Д.А. О подходах к оцениванию параметров по сильно дискретизованным наблюдениям // Вестник МГТУ «Станкин». 2010. № 3 (11). С. 88 - 94.
20. Мастеренко Д.А. Выбор наилучшей оценки измеряемой величины по сильно дискретизованным наблюдениям // Измерительная техника. 2011. № 7. С. 17 – 20.
21. Мастеренко Д.А. Исследование оценок измеряемой величины по сильно дискретизованным наблюдениям // Измерительная техника. 2011. № 8. С. 22 - 24.
22. Мастеренко Д.А. Статистическое оценивание измеряемых величин по сильно дискретизованным наблюдениям при неизвестном параметре масштаба случайной составляющей // Измерительная техника. 2012. № 6. С. 40 – 42.
23. Мастеренко Д.А. Исследование оценок параметров линейной статистической модели по сильно дискретизованным наблюдениям // Вестник МГТУ «Станкин». 2012. № 3 (22). С. 89 – 93.
24. Мастеренко Д.А. Статистическое управление процессами на основе выборочного контроля по суженному допуску и методов обработки сильно дискретизованных наблюдений // Труды 14-й международной конференции «Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта CAD/CAM/PDM – 2014». Москва. 2014. С. 83 - 87.
25. Мастеренко Д.А. Повышение точности информационно-измерительных систем автоматизированного производства на основе методов статистической обработки сильно дискретизованных наблюдений / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва: МГТУ "Станкин", 2015.
26. Мастеренко Д.А. Сравнение методов регулирования процессов на основе измерительной информации контроля по альтернативному признаку по суженному допуску // Вестник МГТУ "Станкин". 2017. № 3 (42). С. 74 - 79.