

Повышение доверия потребителей к результатам измерений на основе подхода к измерительному процессу как к инструменту повышения качества измерений



И.Е. Парфеньева

*к. т. н.,
доцент МАМИ;
Москва*

В условиях рыночных отношений основой конкурентоспособности любого предприятия является высокое качество производимой продукции. Как известно, требуемый уровень качества закладывается на самых ранних стадиях жизненного цикла продукции, т.е. с обоснования необходимости ее создания, далее формирование уровня качества продолжается при проектировании. Достигается этот уровень в процессе производства продукции. При этом большинство свойств, характеризующих ее качество, формируются в ходе технологических процессов. Несовершенство технологического процесса вызывает отклонения действительных значений характеристик продукции от номинальных. Обеспечить заданное качество продукции возможно лишь при постоянном измерительном контроле. В частности, на качество продукции влияют неоднородность свойств исходных материалов, действия человека, низкая надежность средств технологического оснащения, инструментов, их изнашивание. Следовательно, качество технологического процесса – важнейший из критериев, определяющий качество продукции.

Метрологическое обеспечение процесса производства, в основном, заключается в контроле параметров изготавливаемых объектов и технологических процессов. Однако использование только хорошо организованной системы контроля пока-

зателей качества материалов и готовой продукции не могут обеспечить высокое качество продукции. Необходимо еще и управлять процессом производства, понижая влияние дестабилизирующих факторов. Этого можно достичь, только располагая исчерпывающими сведениями о состоянии и возможностях технологических процессов. Необходимый объем и качество измерительной информации позволяют осуществлять статистическое управление процессами (SPC-анализ).

SPC-анализ – мощное орудие современного менеджмента, предназначенное для непрерывного мониторинга и диагностики любых процессов, в том числе и технологических. SPC-анализ, основанный на применении теории вероятностей и математической статистики, позволяет принимать обоснованные решения при управлении технологическими процессами не на основе сто-процентного контроля, а по весьма ограниченному числу наблюдений.

Следует особо отметить, что на достоверность принимаемых управленческих решений влияет качество измерений. Для обеспечения достоверности измерительной информации, получаемой в процессе производства, необходимо минимизировать риск несоответствия фактических характеристик изготавливаемых элементов заданным. Несовершенство измерительного процесса может привести к неправильным решениям при контроле и к перерегулированию процесса. Эту задачу решает анализ измерительных процессов, позволяющий минимизировать этот риск. В системах менеджмента качества автомобильной промышленности этот метод является одним из основных и обязательных к использованию при внедрении требований стандарта ISO/TS 16949.

Анализ измерительных процессов – метод, позволяющий дать заключение относительно приемлемости используемого измерительного процесса через количественное выражение его характеристик.

Измерительный процесс – это процесс, преобразующий значение измеряемого параметра



в результат измерений посредством использования ресурсов (средств измерительной техники и другого оборудования, оператора, окружающей среды и т.д.), регулируемый методикой выполнения измерения [1].

Одними из основных показателей качества измерительного процесса являются точность измерений и достоверность.

Точность измерений отражает близость к нулю погрешности его результата. Для описания точности измерений введены термины: правильность и прецизионность [2, 3].

Достоверность измерений может быть охарактеризована их правильностью.

Правильность характеризует степень близости среднего арифметического значения результатов большого числа измерений к истинному значению и оценивается смещением среднего арифметического значения при многократных измерениях физической величины от предполагаемого истинного значения. Показателем правильности измерений является значение систематической погрешности. Так как истинное значение измеряемой величины неизвестно, то на практике его заменяют опорным значением. Опорное значение определяют как среднее арифметическое, полученное при многократном измерении ($n \geq 20$) параметра детали в метрологической лаборатории с использованием средств измерений более высокой точности, чем средство измерений измерительного процесса. Рекомендуется выбирать образец, значение измеряемого параметра которого находится в середине поля допуска. В таком случае точность измерений – это степень близости результата измерений к принятому опорному значению.

При анализе измерительного процесса рассчитывают относительное смещение среднего арифметического значения измеряемой величины (%B) по следующей формуле:

$$\%B = \frac{|B|}{IT} 100\%,$$

где $|B|$ – абсолютное значение смещения среднего арифметического значения измеряемой величины; IT – стандартный допуск.

Требования точности удовлетворяются, если относительное смещение не превышает 10% стандартного допуска.

Прецизионность результатов измерений – это степень близости друг к другу независимых результатов измерений, полученных в конкретных

регламентированных условиях. Она зависит только от случайных погрешностей и не имеет отношения к истинному или установленному значению измеряемой величины. Прецизионность является общим термином для выражения изменчивости повторяющихся измерений и включает в себя сходимость и воспроизводимость результатов измерений. Сходимость и воспроизводимость представляют собой два крайних случая прецизионности. Сходимость характеризует минимальную, а воспроизводимость – максимальную изменчивость результатов.

Сходимость результатов измерений – это степень близости результатов последовательных измерений одного и того же измеряемого параметра, выполненных повторно одними и теми же средствами измерительной техники, одним и тем же методом и одним и тем же оператором. Разброс результатов измерений возникает по причине действия случайных погрешностей, присущих измерительному процессу. Сходимость может быть выражена количественно в виде дисперсии результатов измерений. Обычно к ней относятся как к дисперсии прибора. Для примера на *рис. 1* это представлено при нормальном законе распределения.

Воспроизводимость результатов измерений – степень близости результатов измерений, сделанных различными операторами на одном и том же приборе, с помощью одной и той же методики измерения, определяющими ту же характеристику одной и той же детали. Воспроизводимость, так же как и сходимость, может быть выражена количественно в виде дисперсии результатов измерений. Обычно к ней относятся как к дисперсии оператора¹. Для примера на *рис. 2* представлена воспроизводимость результатов при измерениях разными операторами.

Все вместе (сходимость плюс воспроизводимость) дает нам дисперсию (изменчивость, разброс) результатов измерений. На *рис. 3* мы видим

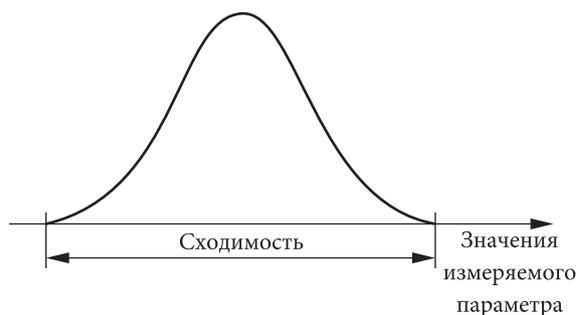


Рис. 1. Сходимость измерительной системы

¹ При анализе воспроизводимости результатов измерений измененные условия вместо другого оператора могут содержать: методику выполнения измерений, место проведения измерений и т.д.

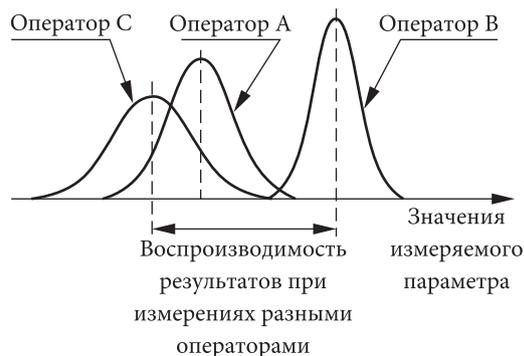


Рис. 2. Воспроизводимость результатов при измерениях разными операторами

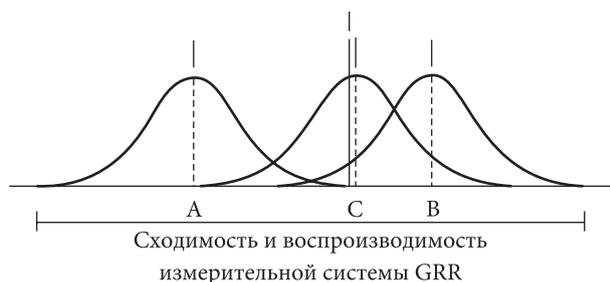


Рис. 3. Сходимость и воспроизводимость результатов измерений GRR

сумму дисперсий для 3-х операторов (А, В и С). Это и есть сходимость и воспроизводимость результатов измерений, которая на английском языке обозначается термином «Gage Repeatability and Reproducibility» – GRR.

Достоверность измерений определяется степенью доверия к результату измерения и характеризуется вероятностью того, что истинное значение измеряемой величины находится в указанных пределах интервала результата измерения. Достоверность измерения характеризуется близостью к нулю случайной или неисключенной систематической погрешности.

Статистический анализ измерительных процессов проводят на основании данных, полученных в результате специально проводимого исследования, заключающегося в многократном измерении образцов детали различными операторами. Перед проведением исследования все средства измерений, используемые в измерительном процессе, должны пройти поверку/калибровку. Разрешающая способность средств измерительной техники должна быть не больше одной десятой ожидаемой изменчивости характеристики процесса (или ширины поля допуска на измеряемый параметр). Это следует из правила «один к десяти». При выборе операторов, осуществляющих сбор данных об измерительном процессе, следует по возможности привлекать как операторов, имеющих большой стаж работы, так и новых операторов, чтобы при исследованиях получить

наибольшую изменчивость результатов измерений разными операторами.

Заключение о приемлемости измерительного процесса выдается на основании оценивания его статистических характеристик – сходимости и воспроизводимости. Этому должен предшествовать анализ процесса на стабильность, выполняемый с помощью контрольной карты средних и размахов.

Стабильность измерительного процесса (статистически управляемое состояние) – состояние измерительного процесса, при котором удалены все особые (неслучайные) причины изменчивости, то есть наблюдаемая изменчивость может быть объяснена системой обычных (случайных) причин.

В случае нестабильности требуются дополнительные исследования причин изменчивости процесса.

Для оценивания измерительного процесса используют метод размахов, метод средних и размахов и метод дисперсий. Самым простым, с точки зрения выполнения расчетов, является *метод размахов*. Этот метод обеспечивает только общую картину измерительного процесса. Он не разделяет изменчивость на сходимость и воспроизводимость, обычно используется в качестве быстрой проверки для подтверждения того факта, что дисперсия результатов измерения не изменилась. Метод средних и размахов дает возможность определить объединенную оценку сходимости и воспроизводимости измерительного процесса, а также оценить каждую из ее составляющих. Метод дисперсий дополнительно позволяет определить значимость каждой составляющей в общей оценке изменчивости. Этот метод является самым точным из представленных, однако довольно сложен для вычислений.

В качестве примера проведем оценку сходимости и воспроизводимости измерительного процесса по методу средних и размахов. Измерения деталей проводятся относительным методом цифровым штангенциркулем (точность 0,01 мм).

1). Отбираем N образцов продукции (рекомендуется $N=10$). Образцы должны быть пронумерованы от 1 до 10 так, чтобы номера не были видны операторам.

Для проведения измерений отбираем M операторов (рекомендуется $M=3$) из числа тех, кто обычно осуществляет измерения в процессе производства или контроля измеряемого параметра образца. Измерение выборки каждым из операторов повторяем Q раз (рекомендуется $Q=3$).

По окончании эксперимента получаем массив данных, который должен содержать ровно Q повторных измерений каждого из N образцов каждым из M операторов. Каждое значение массива



X_{ijk} – результат k -го измерения (попытки) i -го образца j -м оператором. Полученные данные ответственным за оценивание статистических характеристик измерительного процесса заносятся в таблицу (рис. 4).

Результаты оператора «А» записываем в строку «1», оператора «В» – в строку «6», оператора «С» – в строку «11» вышеуказанной таблицы.

2). Цикл измерений операторами А, В и С повторяем дважды и каждый раз детали выбираем в случайном порядке. При этом результаты, полученные оператором «А», записываем в строки «2» и «3» таблицы, оператором «В» – в строки «7» и «8» таблицы, оператором «С» – в строки «12» и «13».

3). Определяем размах результатов измерений каждого образца каждым из операторов, получа-

емый путем вычитания из наибольшего значения наименьшего, и результаты записываем в строки «5», «10», «15» (размахи будут иметь только положительные значения).

4). Суммируем данные строки «5», затем строки «10», затем «15» и делим каждую из сумм на число рассматриваемых образцов, чтобы получить средний размах для первого оператора – \bar{R}_A , для второго оператора – \bar{R}_B , для третьего оператора – \bar{R}_C .

5). Далее складываем ($\bar{R}_A + \bar{R}_B + \bar{R}_C$) и делим на число операторов, получаем $\bar{\bar{R}}$ – средний размах всех измерений, строка «17» таблицы.

6). $\bar{\bar{R}}$ умножаем на D_4 (константа для построения контрольных границ для размахов) и получаем верхнюю контрольную границу для индивидуальных размахов (UCL_R) (строка «19» таблицы). Значе-

Таблица сбора данных для расчета сходимости и воспроизводимости измерительного процесса													
Название и № детали		Название прибора:		Дата									
Характеристика		№ прибора:		Выполнено (Ф.И.О.)									
Размер с допуском:		Тип прибора:											
№ п/п	Контролер/попытка(г)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Средние и размахи	
1	А	1	0,42	-0,45	1,45	0,58	-0,69	-0,13	0,70	-0,20	2,37	-1,25	0,280
2		2	0,52	-0,57	1,28	0,61	-0,81	-0,11	0,86	-0,09	2,08	-1,14	0,263
3		3	0,75	-0,47	1,38	0,75	-0,73	-0,10	0,77	-0,06	2,12	-1,20	0,321
4	Среднее		0,563	-0,497	1,370	0,647	-0,743	-0,113	0,777	-0,117	2,190	-1,197	$\bar{X}_A = 0,228$
5	Размах		0,33	0,12	0,17	0,17	0,12	0,03	0,16	0,14	0,29	0,11	$\bar{R}_A = 0,164$
6	В	1	0,19	-0,36	1,30	0,12	-0,45	0,09	0,58	-0,52	1,91	-1,57	0,129
7		2	0,36	-1,11	1,05	1,14	-1,09	0,33	0,66	-0,28	2,23	-1,51	0,178
8		3	0,18	-0,57	1,45	0,31	-1,17	0,17	0,94	-0,34	2,30	-1,39	0,188
9	Среднее		0,243	-0,680	1,267	0,523	-0,903	0,197	0,727	-0,380	2,147	-1,490	$\bar{X}_B = 0,165$
10	Размах		0,18	0,75	0,40	1,02	0,72	0,24	0,36	0,24	0,39	0,18	$\bar{R}_B = 0,448$
11	С	1	0,15	-1,27	0,97	0,25	-1,35	-0,18	0,13	-0,35	1,88	-1,38	-0,115
12		2	-0,01	-1,02	1,20	0,31	-1,01	-0,56	0,12	-0,45	1,56	-1,66	-0,152
13		3	-0,04	-0,85	0,78	0,22	-1,34	-0,38	0,32	-0,38	1,98	-2,05	-0,174
14	Среднее		0,033	-1,047	0,983	0,260	-1,233	-0,373	0,190	-0,393	1,807	-1,697	$\bar{X}_C = -0,147$
15	Размах		0,19	0,42	0,42	0,09	0,34	0,38	0,20	0,10	0,42	0,67	$\bar{R}_C = 0,323$
16	Среднее по части		0,280	-0,741	1,207	0,477	-0,960	-0,096	0,565	-0,297	2,048	-1,461	$R_p = 3,509$
17	$\bar{\bar{R}} = (\bar{R}_A = 0,164) + (\bar{R}_B = 0,448) + (\bar{R}_C = 0,323) / [\text{количество контролеров} = 3]$											$\bar{\bar{R}} = 0,312$	
18	$[R_o = 0,4446] = [\text{Max } \bar{X} = 0,288] - [\text{Min } \bar{X} = -0,147]$											$R_o = 0,435$	
19	$UCL_R = \bar{\bar{R}} \times D_4$, где $D_4 = 2,57$ – для трех попыток; $[UCL_R = 0,8018] = [\bar{\bar{R}} = 0,312] \times [D_4 = 2,57]$. $UCL_R = 0,8018; LCL_R = 0$. UCL_R – характеризует предел индивидуальных значений R . Обведите те, которые выходят за данный предел. Выясните причину и исправьте ее. Повторите данные замеры, используя того же оператора и ту же часть образцов, или исключите данные из анализа, пересчитав $\bar{\bar{R}}$ и значения предела для оставшихся данных												

Рис. 4. Пример заполнения таблицы сбора данных для оценки сходимости и воспроизводимости измерительного процесса

Таблица 1.

Значения константы K_1

Попытки	K_1
2	1,128
3	1,693
4	2,059

Воспроизводимость AV (изменчивость оператора) рассчитывается по формуле:

$$AV = \sqrt{\left(\frac{R_0}{K_2}\right)^2 - \left[\frac{EV^2}{NQ}\right]} = \sqrt{\left(\frac{0,435}{1,91}\right)^2 - \left[\frac{0,1843^2}{10 \cdot 3}\right]} = 0,2252,$$

где N – число образцов; Q – число попыток; K_2 – константа, определяемая по табл. 2.

Таблица 2.

Значения константы K_2

Операторы	2	3	4
K_2	1,41	1,91	2,24

Сходимость и воспроизводимость результатов измерений равна:

$$GRR = \sqrt{EV^2 + AV^2} = \sqrt{0,1843^2 + 0,2252^2} = 0,2909.$$

Изменчивость образцов рассчитывают по формуле:

$$PV = \frac{R_p}{K_3} = \frac{3,509}{3,18} = 1,1035,$$

где K_3 – константа, определяемая по табл. 3.

Таблица 3.

Значения константы K_3

Образцы	9	10	11
K_3	3,08	3,18	3,27

Общая изменчивость:

$$TV = \sqrt{GRR^2 + PV^2} = \sqrt{0,2909^2 + 1,1035^2} = 1,1412.$$

Далее находим относительные (относительно полной изменчивости измерительного процесса) составляющие изменчивости:

ние нижней контрольной границы (LCL_R) при менее чем 7-ми замерах образцов одним оператором равно нулю.

Определяем и устраняем особую причину, которая вызвала выход процесса измерений из управляемого состояния (за пределом расчетных контрольных границ).

Повторяем все измерения, создающие размах, больший расчетного UCL_R , с помощью того же оператора и используя те же образцы, что и первоначально, или отбрасываем эти значения и пересчитываем \bar{R} и значение верхней контрольной границы UCL_R на основании новых данных измерений.

7). По каждой из строк «1», «2», «3», «6», «7», «8», «11», «12», «13» вычисляем среднее измерений по попыткам и вписываем их в графу «Средние и размахи», правый столбец таблицы.

Суммируем среднее по «1», «2», «3» строке и делим сумму на число попыток. Полученный результат вписываем в блок « \bar{X}_A ». Аналогично определяем \bar{X}_B и \bar{X}_C и вписываем их значения в блоки « \bar{X}_B » и « \bar{X}_C », столбец справа.

8). Определяем среднее по образцам по каждому оператору, то есть заполняем строки «4», «9», «14».

9). Для каждого образца рассчитываем среднее значение результатов его измерений всеми операторами, то есть измерения по каждому образцу, по 3-м попыткам, по 3-м операторам складываем и делим на число измерений. Заполняем строку «16» таблицы «Среднее по части».

10). В строке «16» из наибольшего размаха по образцу вычитаем наименьший размах по образцу и получаем R_p – размах значений параметров образца, вносим его значение в блок « R_p ».

11). Из блоков « \bar{X}_A », « \bar{X}_B » и « \bar{X}_C » определяем наибольшее и наименьшее значения, вычитаем из наибольшего значения наименьшее и получаем значение среднего размаха между измерениями операторов R_o , которое мы вписываем в блок « R_o ».

12). Из «Таблицы сбора данных для оценки сходимости и воспроизводимости измерительного процесса» берем значения « \bar{R} », « R_o », « R_p » и используем их для расчета составляющих изменчивости измерительного процесса.

Сходимость EV (изменчивость оборудования) рассчитывается по формуле:

$$EV = \frac{\bar{R}}{K_1} = \frac{0,312}{1,693} = 0,1843,$$

где K_1 – константа, определяемая по табл. 1.



$$\%EV = \left(\frac{EV}{TV}\right)100 = \left(\frac{0,1843}{1,1412}\right)100 = 16,15\%$$

$$\%AV = \left(\frac{AV}{TV}\right)100 = \left(\frac{0,2252}{1,1412}\right)100 = 19,73\%$$

$$\%GRR = \left(\frac{GRR}{TV}\right)100 = \left(\frac{0,2909}{1,1412}\right)100 = 25,49\%$$

$$\%PV = \left(\frac{PV}{TV}\right)100 = \left(\frac{1,1035}{1,1412}\right)100 = 96,70\%$$

Критерием приемлемости измерительного процесса является значение *GRR* (табл. 4). Сравнивая полученное значение *%GRR* с критерием приемлемости, делаем вывод о приемлемости измерительного процесса с учетом экономических факторов.

Таблица 4.

Критерии приемлемости измерительной системы

Значение <i>%GRR</i>	Вывод о приемлемости измерительного процесса
Менее 10	Измерительный процесс приемлем
От 10 до 30	Измерительный процесс может быть приемлем в зависимости от важности применения, стоимости средств измерительной техники и по согласованию с потребителем
Более 30	Измерительный процесс не пригоден. Требуется корректирующие действия по совершенствованию

Заключение

1. Управление качеством технологического процесса направлено на его поддержание в таком состоянии, чтобы выполнялись все установленные требования к процессу и его результатам. При отклонении характеристик технологического процесса от его цели должна выполняться коррекция на основе соответствующих корректирую-

щих действий. Наиболее эффективным подходом является управление процессом на основе статистических данных о нем. Статистический подход к управлению технологическим процессом основан на глубоком понимании сути изменчивости (вариации) процесса и управлении им на основе мониторинга его основных статистических характеристик.

2. Поскольку основной составной частью любого технологического процесса является измерительный процесс, именно от его качества зависит правильность принимаемых решений по управлению технологическими процессами на основании фактических данных о соответствии выпускаемой продукции установленным требованиям.

3. Оперативный анализ измерительных процессов позволяет делать выводы об их состоянии и приемлемости. В свою очередь это дает возможность в случае необходимости своевременно производить корректирующие действия по их улучшению и, как следствие, гарантировать установленный уровень качества выпускаемой продукции на основе обеспечения заданного качества измерений. Такой подход к измерениям позволяет определять приоритетные пути снижения изменчивости измерительного процесса. Для этого относительные значения составляющих изменчивости необходимо ранжировать по убыванию.

Литература

- ГОСТ 51814.5–2005 Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов.
- ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения.
- Рекомендации по межрегиональной стандартизации РМГ 29-2013 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения». – М.: Стандартинформ, 2014.