

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
 УДК 531.7:311
 DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-3-136-142



УСТАНОВЛЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ТОЧНОСТИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ ПРОЦЕССА

Сойко А.И.¹, Савельева Д.А.¹, Денисова Я.В.²

¹Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технологический университет-КХТИ, Казань, Россия

Аннотация. В статье рассмотрен подход к назначению требований к точности средств измерений с учетом индексов производственных процессов. Существующий нормативный подход (ГОСТ 8.051-81), устанавливающий допускаемую погрешность $\delta_{изм}$ в зависимости от поля допуска ИТ, не учитывает фактическую стабильность технологического процесса, характеризуемую индексом воспроизводимости C_p . Это приводит к несогласованности с требованиями руководства по анализу измерительных систем (MSA) и национальных стандартов, требующих оценки пригодности измерительных процессов через показатель %GRR, зависящий от соотношения погрешности измерений и изменчивости процесса. Применен метод статистического моделирования, основанный на анализе и формализации взаимосвязей между реальной ($\sigma_{тех}$) и наблюдаемой (σ_0) изменчивостью, индексами воспроизводимости C_p , допускаемой погрешностью измерения $\delta_{изм}$, полем допуска ИТ и показателем %GRR. В ходе исследования получены количественные зависимости, показывающие, как условия приемлемости измерительного процесса (%GRR $\leq 10\%$, $\leq 30\%$) соотносятся с вероятностями ошибок первого (m – ложная браковка) и второго (n – пропуск брака) рода для процессов с различной стабильностью ($C_p = 0,8-1,5$). Выявлены критические значения $\delta_{изм}/ИТ$, при которых наблюдаемый индекс C_p перестает быть объективной оценкой реальных возможностей процесса. Разработаны номограммы и алгоритмы, позволяющие по заданным параметрам процесса (C_p , ИТ) и допустимым рискам определить требуемую точность средств измерений. Предложенные подходы и алгоритмы предоставляют инженерам-технологам и метрологам инструмент для экономически обоснованного выбора измерительного оборудования по точности, оценки рисков контроля и планирования мероприятий по совершенствованию технологических процессов и систем метрологического обеспечения. Результаты могут быть использованы при актуализации нормативной документации и внедрении статистических методов управления качеством.

Ключевые слова: выбор средств измерений, допускаемая погрешность, GRR, воспроизводимость процесса, статистическое моделирование, оптимизация метрологического обеспечения, риски контроля

© Сойко А.И., Савельева Д.А., Денисова Я.В., 2026

Для цитирования

Сойко А.И., Савельева Д.А., Денисова Я.В. Установление требований к точности средств измерений на основе статистического моделирования показателей воспроизводимости процесса // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №3. С. 136-142. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-136-142>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
 The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ESTABLISHING REQUIREMENTS FOR THE ACCURACY OF MEASURING INSTRUMENTS BASED ON STATISTICAL MODELING OF PROCESS REPRODUCIBILITY INDICES

Soyko A.I.¹, Savelyeva D.A.¹, Denisova Ya.V.²

¹Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia

²Kazan National Research Technological University-KNRTU, Kazan, Russia

Abstract. The paper considers an approach to establishing requirements for the accuracy of measuring instruments with due regard to production process capability indices. The existing regulatory approach (GOST 8.051-81), which specifies the permissible measurement error δ_{meas} depending on the tolerance field IT, does not take into account the actual stability of the technological process characterized by the process capability index C_p . This results in inconsistency with the requirements of Measurement Systems Analysis (MSA) guidelines and national standards, which require the suitability of measurement processes to be assessed using the %GRR indicator, which depends on the ratio between measurement error and process variability. A statistical modeling method has been applied based on the analysis and formalization of the relationships between actual (σ_{tech}) and observed (σ_o) variability, the process capability index C_p , permissible measurement error δ_{meas} , tolerance field IT, and the %GRR indicator. The study has established quantitative relationships showing how the measurement process acceptability criteria (%GRR $\leq 10\%$, $\leq 30\%$) correspond to the probabilities of Type I (m – false rejection) and Type II (n – failure to detect a nonconforming item) errors for processes with different levels of stability ($C_p = 0.8-1.5$). Critical values of the $\delta_{\text{изм}}/IT$ ratio have been identified at which the observed C_p index ceases to provide an objective assessment of the actual process capability. Nomograms and algorithms have been developed that make it possible to determine the required accuracy of measuring instruments based on specified process parameters (C_p , IT) and acceptable risks. The proposed approaches and algorithms provide process engineers and metrologists with a tool for the economically justified selection of measuring equipment in terms of accuracy, assessment of inspection risks, and planning of measures to improve technological processes and metrological assurance systems. The results can be used to update regulatory documentation and implement statistical quality control methods.

Keywords: measuring instrument selection, permissible measurement error, GRR, process reproducibility, statistical modeling, optimization of metrological assurance, inspection risks

For citation

Soyko A.I., Savelyeva D.A., Denisova Ya.V. Establishing Requirements for the Accuracy of Measuring Instruments Based on Statistical Modeling of Process Reproducibility Indices. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 3, pp. 136-142. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-3-136-142>

Введение

В условиях цифровой трансформации производства и ужесточения требований к качеству продукции возникают две противоречивые ситуации. С одной стороны, технологические процессы должны обеспечивать стабильно высокую воспроизводимость ($C_p \geq 1,33$), с другой – существующие требования к средствам измерений (СИ) часто вносят значительную погрешность, искажая реальную картину. В результате этого некорректная оценка способности процесса приводит либо к принятию негодных изделий (риск потребителя α), либо к необоснованному браку годной продукции (риск производителя β).

В стандарте [1] установлены базовые требования, регламентирующие допустимую погрешность измерения $\delta_{\text{изм}}$ в диапазоне от 20 до 35% от поля допуска на изготовление (IT) и качества. Однако он определяет минимальные требования к точности измерений, которые могут быть недостаточными для современного производства. Так, требования к погрешности СИ в зависимости от фактической воспроиз-

водимости технологического процесса C_p могут быть различными. Кроме того, применение одного и того же соотношения $\delta_{\text{изм}}/IT$ для процессов с $C_p = 0,8$ и $C_p = 1,67$ приводит к принципиально разным уровням риска.

Для обеспечения конкурентоспособности и соответствия международным стандартам на практике нашли применение более строгие требования MSA или модифицированные критерии, основанные на статистическом анализе воспроизводимости процесса (%GRR) [2, 3]. Однако эти требования на практике разрозненны и не позволяют установить объективную взаимосвязь между точностью процесса (C_p), точностью измерений ($\delta_{\text{изм}}/IT$, %GRR), наблюдаемыми показателями воспроизводимости (C_{po}) и вероятностями ошибок I и II рода (α , β). Решение такой задачи позволит обоснованно при выборе СИ обеспечивать баланс между стоимостью измерительного оборудования, операционными потерями от ошибочных решений и требуемым уровнем качества, выходя за рамки пассивного соблюдения нормативных требований.

Выбор между этими требованиями зависит от целей контроля, например, для формального приемочного контроля достаточно ГОСТ 8.051-81, для эффективного управления процессом необходим MSA с оценкой и снижением погрешности измерений (табл. 1). Для современного производства актуальным является интеграция обоих подходов с приоритетом на MSA для критичных характеристик.

Таблица 1. Сравнительный анализ требований к оценке погрешности измерений
Table 1. Comparative analysis of requirements for the assessment of measurement error

Критерий	Требования стандарта [1]	Требования к измерительному процессу (MSA) [2, 3]
Цель	Обеспечение единства измерений при приемочном контроле	Пригодность для SPC
Метод	Таблицы абсолютных значений из соотношения $\delta_{изм}/IT$	Статистический анализ %GRR
Условия применимости	$\delta \leq (0,2-0,35) \cdot IT$ в зависимости от качества	Установление зон приемлемости процесса %GRR $\leq (10-30) \%$
Учет процесса	Через качество	Через общую изменчивость или допуск
Ошибки контроля	Таблицы значений m, n, c через $A_{мет(с)}$	Расчет α, β с учетом индексов $C_p, (C_{pk})$
Экономические потери	Не учитываются в явном виде	Учет потерь от ошибок

Целью исследования является разработка подхода для установления оптимальных, экономически обоснованных требований к точности средств измерений, обеспечивая комплексный анализ взаимосвязи реальной воспроизводимости технологического процесса (C_p), погрешности измерений ($\delta_{изм}/IT$, %GRR) и вероятностей ошибочных решений. Данное исследование послужит основой для выбора СИ, которое минимизирует совокупные издержки контроля как при соблюдении требований [1], так и при необходимости достижения более высоких стандартов, предписанных требованиями MSA [2, 3].

Требования к допускаемой погрешности измерений

Максимальная допускаемая погрешность измерения – максимальное значение погрешности измерения (без учета знака), разрешенное спецификацией или нормативными документами для данного измерения [4].

В литературе большое внимание уделяют возможности установления такой погрешности, исходя из заданной вероятности отнесения изделий к неправильно забракованным m и неправильно принятым n [5-8]. На основе аппарата теории вероятностей известны формулы и построены графики, устанавливающие зависимость значений m и n от соотношений между погрешностью измерений, параметрами технологического процесса и допуском на изготовление IT .

В качестве количественной оценки погрешности измерений в [1] используется величина среднего квадратического отклонения погрешности измерения $\sigma_{мет}$ (по тексту статьи – $\sigma_{изм}$), а в качестве количественной оценки качества контролируемого процесса – отношение $IT/\sigma_{тех}$, где $\sigma_{тех}$ – среднее квадратическое отклонение контролируемого параметра. Данное отношение может быть выражено через потенциальную способность процесса или индекс воспроизводимости C_p [9]:

$$C_p = \frac{IT}{6 \cdot \sigma_{тех}}. \quad (1)$$

Основной показатель пригодности измерительного процесса – сходимость и воспроизводимость (%GRR), приведенный в процентах относительно допуска IT , определяет процент вклада дисперсии измерений в общую дисперсию и показывает долю разброса, вызванного «шумом» измерений [2, 3]. Так, показатель %GRR $\leq 10\%$ является приемлемым, условно приемлемым при $10\% < \%GRR \leq 30\%$, высокий %GRR $> 30\%$ означает, что измерения не обладают достаточной чувствительностью для обнаружения изменений процесса, что приводит к завышенной оценке разброса σ , заниженной оценке индекса воспроизводимости C_p , а также неспособности эффективно контролировать процесс в реальном времени, увеличивая ошибки ложного брака α (обозначение n в [1]) и пропуска брака β (обозначение m в [1]).

Таким образом, ГОСТ 8.051-81 задает предельную допускаемую погрешность измерения, а MSA предоставляет подходы для диагностики и управления составляющими этой погрешности. Для высокостабильных процессов (с высокими индексами C_p) применение только требований ГОСТ 8.051-81 может привести к выбору СИ с формально допустимой, но слишком большой погрешностью, делающей систему контроля неэффективной. Поэтому необходимо использовать требование ГОСТ 8.051-81 как обязательный базовый уровень, а MSA – как инструмент для обеспечения того, что выбранное СИ способно адекватно оценивать конкретный процесс с его уровнем изменчивости. Сравнение требований точности к СИ при контроле деталей с учетом требований [1-3] приведено на рис. 1.

Наблюдаемая изменчивость процесса σ_o определяется как

$$\sigma_o = \sqrt{\sigma_{тех}^2 + \sigma_{изм}^2}, \quad (2)$$

где $\sigma_{тех}$ – реальная изменчивость процесса (точность техпроцесса [1]); $\sigma_{изм}$ – изменчивость измерительного процесса (прибора), связанная с индексом сходимости и воспроизводимости прибора (GRR),

$$\sigma_{изм} = \frac{IT \cdot GRR}{6} = \frac{IT \cdot \%GRR}{6 \cdot 100}, \quad (3)$$

где %GRR – значение GRR относительно допуска IT , %.

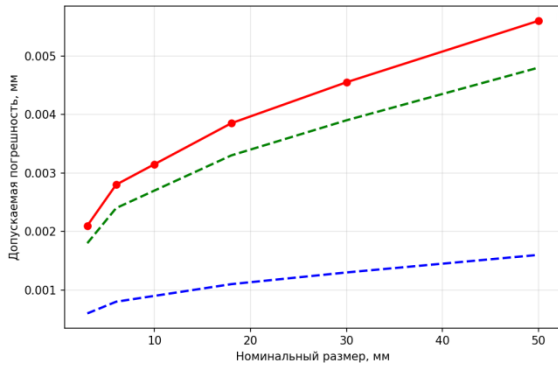


Рис. 1. Сравнение абсолютных значений требований к точности, установленных:

— ГOST 8.051-81; — MSA (%GRR ≤ 10%);
— MSA (%GRR ≤ 30%)

Fig. 1. Comparison of the absolute values of accuracy requirements established by:

— GOST 8.051-81; — MSA (%GRR ≤ 10%);
— MSA (%GRR ≤ 30%)

Наблюдаемую изменчивость процесса σ_0 также можно выразить через наблюдаемый индекс воспроизводимости C_{p0} :

$$\sigma_0 = \frac{IT}{6 \cdot C_{p0}}, \quad (4)$$

Для достижения требуемого значения индекса C_p необходимо выполнение следующего условия $C_{p0} \geq C_p$ или

$$\frac{IT}{6 \cdot \sqrt{\sigma_{\text{тех}}^2 + \sigma_{\text{изм}}^2}} \geq C_p. \quad (5)$$

Требование к выбору СИ будем строить из условия

$$\sigma_{\text{изм}} \leq \sqrt{\sigma_0^2 - \sigma_{\text{тех}}^2}. \quad (6)$$

Используя связь изменчивости процесса с ее индексами, можно записать

$$\sigma_{\text{изм}} \leq IT \sqrt{\left(\frac{1}{6 \cdot C_p}\right)^2 - \left(\frac{1}{6 \cdot C_{pA}}\right)^2}. \quad (7)$$

Реальная изменчивость процесса $\sigma_{\text{тех}}$ может быть выражена через реальный индекс воспроизводимости процесса C_{pA} :

$$\sigma_{\text{тех}} = \frac{IT}{6 \cdot C_{pA}}. \quad (8)$$

Реальный индекс воспроизводимости процесса C_{pA} согласно [3] определяется как

$$C_{pA} = \frac{C_{p0}}{\sqrt{1 - (GRR \cdot C_{p0})^2}}. \quad (9)$$

Для стабильных процессов оценить погрешность измерения можно как

$$\delta_{\text{изм}} = 3 \cdot \sigma_{\text{изм}}. \quad (10)$$

Подставляя $\sigma_{\text{изм}}$ из формулы (10) в (7) и используя отношение допуска к технологическому отклонению $k = \frac{IT}{\sigma_{\text{тех}}}$ [1], путем несложных преобразований можно получить условие выбора СИ:

$$\frac{\delta_{\text{изм}}}{IT} \leq 3 \sqrt{\left(\frac{1}{6 \cdot C_p}\right)^2 - \left(\frac{1}{k}\right)^2}. \quad (11)$$

Для установления связи между GRR и $\delta_{\text{изм}}/IT$ в предположении нормального распределения при уровне доверия 99,73% можно воспользоваться

$$\frac{\delta_{\text{изм}}}{IT} = \frac{3 \cdot \sigma_{\text{изм}}}{IT} = \frac{3 \cdot IT \cdot GRR}{6 \cdot IT} = \frac{GRR}{2}. \quad (12)$$

Статистическое моделирование исследования погрешности измерений с учетом оценки индекса воспроизводимости технологического процесса и рисков ошибочных решений осуществлялось методом Монте-Карло. Моделируется $N = 10^6$ деталей с различными реальными размерами, распределенных по нормальному закону с центром, соответствующим середине поля допуска, и реальной изменчивостью процесса $\sigma_{\text{тех}}$. К каждому реальному размеру добавляется погрешность измерения со средним квадратическим отклонением $\sigma_{\text{изм}}$. Наблюдаемый размер сравнивается с границами допуска и формируются вероятности ошибок I и II рода (α , β). В процессе экспериментов варьируются параметры C_{pA} от 0,8 до 2,0 и %GRR – от 5 до 60 %.

Минимальное условие достижимости по формуле (11) может быть получено при условии $k \geq 6 \cdot C_p$. Если принять $k = 8$, то $\delta_{\text{изм}}/IT$ составит 2,6% от IT . Индекс сходимости и воспроизводимости прибора (%GRR) согласно (12) составит 5,2%, что удовлетворяет требованиям к измерительному процессу (MSA). Чтобы обеспечить %GRR ≤ 10%, необходимо $k \leq 8,05$, и выбирать $\delta_{\text{изм}}/IT \leq 5\%$. При $k > 8,7$ отношение $\delta_{\text{изм}}/IT$ увеличивается и для удовлетворения требованию MSA (%GRR ≤ 30%) необходимо обеспечить $\delta_{\text{изм}}/IT \leq 15\%$ (рис. 2). Зона на номограмме, расположенная ниже штрихпунктирной линии, условиям выбора СИ не удовлетворяет ($k < 6 \cdot C_p$).

В процессе моделирования были выделены четыре зоны, определяющие отношения $\delta_{\text{изм}}/IT$, суммарная вероятность ошибок I и II рода при этом показана для случая $C_{pA} = 1,33$ (рис. 3):

а) более 20 % – зона, в которой возникают высокие ошибки принятия неправильных решений. В данном случае погрешность «съедает» 20% от допуска на размер IT . Поскольку измерения дают лишь грубую

оценку, экономически нецелесообразно использовать точные СИ (например, штангенциркуль с погрешностью $\delta_{\text{СИ}} = 0,1$ мм для допусков не более 0,5 мм);

б) от 10 до 20% – зона, определяющая баланс между точностью и стоимостью измерений. Приемлемо для большинства машиностроительных деталей, контроль может осуществляться средствами средней точности с суммарной ошибкой контроля от 2 до 5 % (например, микрометр с погрешностью $\delta_{\text{СИ}} = 0,01$ мм для допусков 0,05–0,10 мм);

в) от 5 до 10% – зона для перехода к точным измерениям критически важных параметров. Использование дорогих СИ и квалифицированного персонала позволяют повысить точность и достоверность результатов, снижая суммарные ошибки контроля до 2% (например, индикаторы многооборотные $\delta_{\text{СИ}} = 0,005$ мм для допуска 0,05 мм);

г) менее 5% – зона, определяющая требования MSA (%GRR < 10%), предполагает использование СИ высокой точности, значительных затрат на их обслуживание и поверку, суммарная ошибка контроля не превышает 1%.

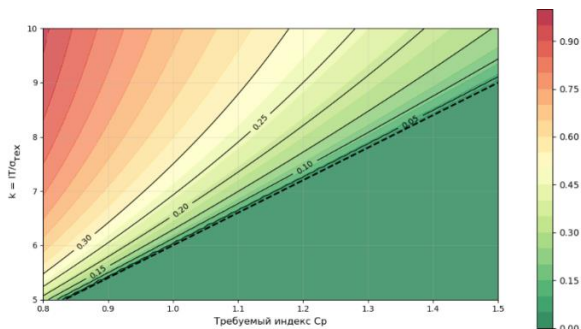


Рис. 2. Номограмма с изолиниями $\delta_{\text{изм}}/IT$:

— — — линия $k = 6 \cdot C_p$

Fig. 2. Nomogram with isolines δ_{mes}/IT :

— — — line $k = 6 \cdot C_p$

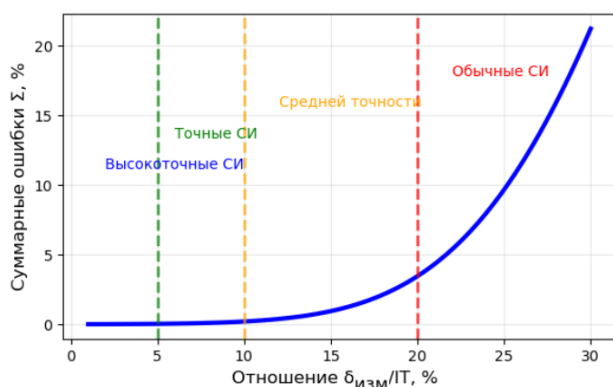


Рис. 3. Влияние точности выбранного СИ на ошибки контроля (при $C_{pA} = 1,33$)

Fig. 3. Effect of the accuracy of the selected measuring instrument on inspection errors (at $C_{pA} = 1.33$)

С учетом роста уровня стабильности технологического процесса, характеризуемого индексом вос-

производимости C_p , ужесточаются требования к точности СИ (табл. 2). Для нестабильных процессов неэффективно использовать высокоточные СИ, поскольку сначала нужно улучшать технологию. Для стабильных процессов необходимы точные СИ, чтобы эффективно контролировать малые вариации и минимизировать риски ошибочных решений.

Таблица 2. Отношение $\delta_{\text{изм}}/IT$ в зависимости от качества производственного процесса

Table 2. Ratio δ_{mes}/IT depending on the quality of the production process

Качество процесса	C_p	k_{min}	$\delta_{\text{изм}}/IT$	Рекомендация
Нестабильный процесс, грубые измерения	0,50	3,0	> 0,2	Улучшить процесс, затем измерения
Минимально приемлемый процесс	1,00	6,0	0,1–0,2	Средняя точность СИ (микрометры)
Стабильный процесс	1,33	8,0	0,05–0,15	Точные СИ (индикаторы, оптиметры)
Высококачественный процесс	1,5	9,0	0,03–0,10	Точные и высокоточные СИ

Пример 1. Известны требования к контролю размера отверстия $\varnothing 45H12^{(+0,25)}$. Предположим, индекс воспроизводимости процесса производства $C_p = 1,0$, смещение отсутствует. По ГОСТ 8.051-81 допускаемая погрешность $\delta_{\text{изм}} = 50$ мкм, что составляет 20% от IT . Число неправильно принятых деталей в процентах от общего числа измеренных $m = (3,1–3,5)\%$, число неправильно забракованных деталей в процентах от общего числа измеренных $n = (4,50–4,75)\%$, вероятностная величина выхода размера за предельные у неправильно принятых деталей $c = 0,14 \cdot IT$. Согласно [10], контроль может осуществляться нутромером НИ 18–50–2 по ГОСТ 868-82 с погрешностью $\delta_{\text{СИ}} = 20$ мкм или микроскопом универсальным по ГОСТ 8074-82 с погрешностью $\delta_{\text{СИ}} = 10$ мкм. Как изменятся требования к контролю и средству измерений при достижении индекса $C_{pO} \approx 1,33$?

Реальная изменчивость (без погрешности)

$$\sigma_{\text{тех}} = \frac{IT}{6 \cdot C_{pA}} = \frac{0,25}{6 \cdot 1,0} = 0,042 \text{ мм.}$$

Среднее квадратическое отклонение погрешности измерения

$$\sigma_{\text{изм}} = \frac{\delta_{\text{изм}}}{3} = \frac{0,05}{3} = 0,017 \text{ мм.}$$

Наблюдаемая изменчивость процесса σ_O определяется как

$$\sigma_O = \sqrt{\sigma_{\text{тех}}^2 + \sigma_{\text{изм}}^2} = \sqrt{0,042^2 + 0,017^2} = 0,045 \text{ мм.}$$

Наблюдаемый индекс

$$C_{pO} = \frac{IT}{6 \cdot \sigma_O} = \frac{0,25}{6 \cdot 0,045} = 0,926 < 1,33.$$

Вероятное количество неправильно принятых деталей $m \approx 2,2\%$, неправильно забракованных $n \approx 2,9\%$ (суммарно около 5,1%) (табл. 3).

Таблица 3. Результаты моделирования параметров контроля при различных $\delta_{изм}/IT$ и C_p процесса

Table 3. Results of modeling inspection parameters for different δ_{meas}/IT ratios and process C_p values

Параметр	Значения		
	исходные (по [1])	в условиях стабильности	в условиях стабильности и пригодности (MSA)
$\delta_{изм}/IT$	0,020 или 20 %	0,094 или 9,4 %	0,043 или 4,3 %
Δ , мкм	50,0	23,5	11,0
$A_{мет(г)}$	6,7	3,1	1,5
$\sigma_{тех}$, мм	0,042	0,031	0,032
$IT/\sigma_{тех}$	6,0	8,0	7,8
C_p процесса	1,00	1,40	1,34
C_{p0}	0,93	1,35	1,33
Среднее m , %	2,23	0,67	0,28
Среднее n , %	2,92	0,93	0,54
Σ	5,15	1,60	0,82

Наименьшие ошибки контроля ($m = 0,67\%$, $n = 0,93\%$, $\Sigma = 1,60\%$) достигаются при целевом значении $C_p = 1,40$, наблюдаемый индекс при этом составит $C_{p0} = 1,35$. Отношение $\delta_{изм}/IT$ составит 9,4% (что соответствует погрешности измерений 23,5 мкм для допуска 250 мкм). Согласно (12), $\%GRR < 30\%$, что определяет измерительный процесс как условно пригодный.

Для достижения $\%GRR \leq 10\%$ необходимо выбирать СИ из отношения $\delta_{изм}/IT = 0,043$, суммарная ошибка контроля уменьшается в 2 раза по сравнению с результатами, полученными при индексе $C_p = 1,40$ (см. табл. 3). Таким образом, легко заметить, что контроль данного размера нутромером НИ 18–50–2 по ГОСТ 868-82 с погрешностью $\delta_{си} = 20$ мкм согласно [10] можно охарактеризовать как условно пригодный, а контроль микроскопами универсальными по ГОСТ 8074-82 – как пригодный в условиях стабильности производственного процесса, соответствующий требованиям [2, 3].

Повышение стабильности процесса (C_p растет) и выбор более грубых (или дешевых) СИ для контроля приводит к увеличению ошибок контроля. Однако на практике обычно стремятся уменьшать ошибки контроля. Поэтому оптимальным будет выбор такого C_p процесса и такой погрешности измерения, которые минимизируют суммарные потери от ошибок контроля.

Таким образом, на основе достигнутого уровня качества производства (индекса C_p) можно определять требуемую точность СИ и приоритеты действий (улучшать процесс или ужесточать контроль), а также выбирать СИ в условиях контроля с необходимыми параметрами ошибок I и II рода.

Заключение

Проведенное исследование позволило разработать целостный подход к формированию требований к точности СИ, интегрирующий принципы статистического управления процессами (SPC) и анализа измерительных систем (MSA). На основе требований ГОСТ 8.051-81 и MSA проведен комплексный анализ взаимосвязи воспроизводимости технологического процесса (C_{p0}), погрешности измерений ($\delta_{изм}/IT$, $\%GRR$) и вероятностей ошибочных решений (α , β).

Полученные результаты позволили подтвердить, что пороговые значения $\%GRR$ в 10 и 30%, связанные с нормируемыми отношениями $\delta_{изм}/IT$ по ГОСТ 8.051-81, соответствуют принципиально разным уровням контроля над процессом и сопряжены с различными количественно оцениваемыми рисками α (ложной браковки) и β (пропуска брака), величина которых критически зависит от реального индекса воспроизводимости процесса C_p .

На основе вычислительных экспериментов статистического моделирования были:

а) определены критические значения $\delta_{изм}/IT$, при которых погрешность СИ доминирует над технологическим разбросом, делая наблюдаемый C_p нерепрезентативным;

б) построены зоны соответствия требованиям MSA (C_p , $\delta_{изм}/IT$), позволяющие визуально оценить адекватность выбранного СИ для процесса заданной стабильности;

в) разработаны практические номограммы и алгоритмы, которые для заданного качества (IT), целевого уровня рисков (α , β) и известного C_p процесса позволяют выработать рекомендации о точности принимаемого СИ на основе $\delta_{изм}/IT$ и $\%GRR$.

Таким образом, представленный подход представляет инженерам, метрологам и руководителям производства научно обоснованный инструмент для принятия взвешенных решений, направленных на повышение качества продукции и эффективности контроля при оптимальном использовании ресурсов. Дальнейшим развитием работы может стать разработка специализированного программного обеспечения, реализующего предложенные алгоритмы и модели в удобном для пользователя интерфейсе.

Список источников

1. ГОСТ 8.051-81 ГСИ. Погрешности, допускаемые при измерении линейных размеров до 500 мм. Введ. 1982.01.01. Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2004. 12 с.
2. ГОСТ Р 51814.5-2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. Введ. 2005.07.01. М.: Стандартинформ, 2005. 54 с.
3. Анализ измерительных систем. Ссылочное руководство. MSA: пер. с англ. Н. Новгород: ООО СМЦ «Приоритет», 2012. 422 с.

4. РМГ 29-2013 ГСИ. Метрология. Основные термины и определения. Введ. 2015.01.01. Взамен РМГ 29-99. М.: Стандартиформ, 2014. 69 с.
5. Гвоздев В.Д. Допустимая погрешность измерений: выбор значения // Законодательная и прикладная метрология. 2013. №2. С. 44-48.
6. Соломахо Д.В. Метрологическое моделирование процессов операционного контроля геометрических параметров деталей как инструмент обеспечения достоверности // Приборы и методы измерений. 2011. №1 (2). С. 117-121.
7. Чигрик Н.Н. Исследование влияния погрешности средства измерений на параметры разбраковки и точность технологического процесса при измерительном контроле высоты поршневых колец автомобильного двигателя // ОНВ. 2014. №2 (130). С. 86-92.
8. Леонов О.А., Антонова У.Ю. Выбор универсальных средств измерений для контроля гильз цилиндров двигателя при селективной сборке // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 6. С. 52-57.
9. ГОСТ Р ИСО 22514-4-2021. Статистические методы. Управление процессами. Часть 4. Оценка показателей воспроизводимости и пригодности процесса. Введ. 2022.01.01. Взамен ГОСТ Р 50779.46-2012/ ISO/TR 22514-4:2007. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 40 с.
10. РД 50-98-86. Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров до 500 мм (по применению ГОСТ 8.051-81). Введ. 1987.07.01. М.: Госстандарт СССР, 1987. 68 с.
2. GOST R 51814.5-2005. Quality management systems in the automotive industry. Analysis of measurement and control processes. Moscow: Standartinform, 2005, 54 p. (In Russ.)
3. Analysis of measuring systems. Reference guide. MSA: Translation from English. Nizhny Novgorod: SMC Prioritet LLC, 2012, 422 p. (In Russ.)
4. RMG 29-2013 GSI. Metrology. Basic terms and definitions. Replaced RMG 29-99. Moscow: Standartinform, 2014, 69 p. (In Russ.)
5. Gvozdev V.D. Permissible measurement error: choosing a value. *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya* [Legislative and applied metrology]. 2013;(2):44-48. (In Russ.)
6. Solomakho D.V. Metrological modeling of operational control processes of geometric parameters of parts as a tool for ensuring reliability. *Pribory i metody izmereniy* [Instruments and methods of measurement]. 2011;(1(2)):117-121. (In Russ.)
7. Chigrik N.N. Study of the influence of the error of the measuring instrument on the parameters of rejection and the accuracy of the technological process during measuring control of the height of piston rings of an automobile engine. *ONV* [Omsk Scientific Bulletin]. 2014;(2(130)):86-92. (In Russ.)
8. Leonov O.A., Antonova U.Yu. Selection of universal measuring instruments for monitoring engine cylinder liners during selective assembly. *Traktory i selkhoz mashiny* [Tractors and agricultural machinery]. 2017;(6):52-57. (In Russ.)
9. GOST R ISO 22514-4-2021. Statistical methods. Process control. Part 4. Evaluation of process capability and suitability. Replaced GOST R 50779.46-2012/ISO/TR 22514-4:2007. Moscow: Russian Institute of Standardization, 2021, 40 p. (In Russ.)
10. RD 50-98-86 Guidelines. Selection of universal measuring instruments for linear dimensions up to 500 mm (using GOST 8.051-81). Moscow: USSR State Standard, 1987, 68 p. (In Russ.)

References

Поступила 21.02.2026; принята к публикации 16.03.2026; опубликована 30.09.2026
Submitted 21/02/2026; revised 16/03/2026; published 30/09/2026

Сойко Алексей Игорьевич – кандидат технических наук, доцент,
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия.
Email: alexsoiko@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8331-351X

Савельева Дарья Алексеевна – студент,
Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, Казань, Россия.
Email: savelevadasha2004@mail.ru.

Денисова Яна Владимировна – кандидат экономических наук, доцент,
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия.
Email: ana-denisova@inbox.ru. ORCID 0000-0003-1242-6909

Alexey I. Soyko – PhD (Eng.), Associate Professor,
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia.
Email: alexsoiko@yandex.ru. ORCID 0000-0001-8331-351X

Daria A. Savelyeva – Student,
Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia.
Email: savelevadasha2004@mail.ru.

Yana V. Denisova – PhD (Eng.), Associate Professor,
Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia
Email: ana-denisova@inbox.ru. ORCID 0000-0003-1242-6909