

ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОВЕРКЕ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Б. В. Цыпин¹, С. П. Прокопчук²

^{1,2} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ cypin@yandex.ru, ² sunfil@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является технологическая проверка сложных технических изделий. Предмет исследования – оценка результатов измерений при проведении технологической проверки. Цель работы – представление методов и критериев оценки результатов проверки. *Материалы и методы.* Приведены основные математические соотношения, рекомендации по организации и порядку проведения проверки и для оценки результатов измерений. Теоретический материал проиллюстрирован примером анализа результатов технологической проверки железнодорожной радиостанции. *Результаты.* Материал статьи позволяет объективно оценить качество проверки по критериям стабильности, сходимости и воспроизводимости результатов измерений, смещения результатов и его линейности. *Выводы.* Приведенные материалы позволяют оценить приемлемость измерительного процесса на основе рекомендаций государственных стандартов РФ.

Ключевые слова: измерения, технологическая проверка, измеряемые параметры, анализ измерительного процесса

Для цитирования: Цыпин Б. В., Прокопчук С. П. Оценка результатов измерений при технологической проверке сложных технических объектов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2024. № 4. С. 92–102. doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-11

ASSESSMENT OF MEASUREMENT RESULTS DURING TECHNOLOGICAL CHECKING OF COMPLEX TECHNICAL OBJECTS

B.V. Tsypin¹, S.P. Prokopchuk²

^{1,2} Penza State University, Penza, Russia

¹ cypin@yandex.ru, ² sunfil@yandex.ru

Abstract. *Background.* The object of the study is technological testing of complex technical products. The subject of the study is the assessment of measurement results during technological testing. The purpose of the work is to present methods and criteria for assessing inspection results. *Materials and methods.* The basic mathematical relationships, recommendations for the organization and procedure of testing and for assessing measurement results are given. The theoretical material is illustrated by an example of analyzing the results of a technological inspection of a railway radio station. *Results.* The material in the article allows us to objectively assess the quality of the test based on the criteria of stability, convergence and reproducibility of measurement results, bias of results and its linearity. *Conclusions.* The presented materials allow us to assess the acceptability of the measurement process based on the recommendations of state standards of the Russian Federation.

Keywords: measurements, technological verification, measured parameters, analysis of the measuring process

For citation: Tsypin B.V., Prokopchuk S.P. Assessment of measurement results during technological checking of complex technical objects. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measuring. Monitoring. Management. Control.* 2024;(4): 92–102. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-5538-2024-4-11

Введение

При технологической проверке технически сложных изделий важно оценить качество проверки по критериям стабильности, сходимости и воспроизводимости результатов измерений, смещения результатов и его линейности. Такая оценка позволяет определить приемлемость измерительного процесса. Процесс оценки качества проверки проиллюстрирован

на примере контроля мощности несущей частоты передатчиков железнодорожных радиостанций РЛСМ-10-30-Д [1, 2].

Исследование измерительного процесса на стабильность

Для исследования стабильности достаточно десяти циклов измерительных экспериментов ($N = 10$), каждый цикл включает три измерения ($Q = 3$). Измерения должны проводиться одним оператором через равные интервалы времени. Результаты заносятся в «Контрольную карту средних и размахов»¹. Пример такой карты приведен на рис. 1 [1].

Контрольная карта средних и размахов

Радиостанция	РЛСМ-10-30		
Измеряемый параметр:	Мощность несущей частоты передатчиков		Единицы измерения: ВТ
Норма для радиостанции:	10,0	Верхняя граница допуска, USL: 11,0	Нижняя граница допуска, LSL: 9,0
Средство измерения:	Анализатор системы связи R8000B		Номер СИ 800LQW0012
Количество циклов, N:	10		
Количество измерений в цикле, Q:	3		
Количество операторов, M:	1		

№ цикла	№ измерения в цикле			Расчетные значения							
	1	2	3	$X_{срi}$	$X_{ср.ср.}$	UCL_x	LCL_x	R_i	$R_{ср.}$	UCL_R	LCL_R
1	9,60	9,60	9,70	9,633	9,647	9,708	9,585	0,100	0,060	0,154	0,000
2	9,70	9,70	9,70	9,700	9,647	9,708	9,585	0,000	0,060	0,154	0,000
3	9,60	9,60	9,70	9,633	9,647	9,708	9,585	0,100	0,060	0,154	0,000
4	9,60	9,60	9,60	9,600	9,647	9,708	9,585	0,000	0,060	0,154	0,000
5	9,60	9,70	9,60	9,633	9,647	9,708	9,585	0,100	0,060	0,154	0,000
6	9,70	9,70	9,70	9,700	9,647	9,708	9,585	0,000	0,060	0,154	0,000
7	9,70	9,70	9,60	9,667	9,647	9,708	9,585	0,100	0,060	0,154	0,000
8	9,60	9,60	9,60	9,600	9,647	9,708	9,585	0,000	0,060	0,154	0,000
9	9,60	9,70	9,60	9,633	9,647	9,708	9,585	0,100	0,060	0,154	0,000
10	9,60	9,70	9,70	9,667	9,647	9,708	9,585	0,100	0,060	0,154	0,000

Рис. 1. Контрольная карта средних и размахов

Таким образом, массив данных результатов экспериментов содержит N циклов повторных измерений образца по Q измерений. Каждое значение массива X_{ik} – результат k -го измерения образца в i -м цикле, т.е. индекс i – номер цикла измерений от 1 до N ; k – номер измерения образца в цикле от 1 до Q .

Для каждого i -го цикла измерений рассчитывается среднее значение результатов измерений $X_{ср.i}$, среднее значение результатов всех измерений $X_{ср.ср.}$, контрольные границы для средних UCL_x и LCL_x , размах результатов измерений R_i , средний размах $R_{ср.}$, а также контрольные границы для размахов UCL_R и LCL_R [1] по следующим формулам:

$$X_{ср.i} = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q X_{ik}; \tag{1}$$

$$R_i = \max_{k=1, Q} (X_{ik}) - \min_{k=1, Q} (X_{ik});$$

$$X_{ср.ср.} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{ср.i};$$

¹ ГОСТ Р 51814.5–2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200039941>

² Там же.

$$R_{cp.} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i;$$

$$UCL_X = X_{cp.} + A_2 R_{cp.};$$

$$LCL_X = X_{cp.} - A_2 R_{cp.};$$

$$UCL_R = D_4 R_{cp.};$$

$$LCL_R = D_3 R_{cp.},$$

где UCL_X , LCL_X – верхняя и нижняя границы контрольной карты средних соответственно; UCL_R , LCL_R – верхняя и нижняя границы контрольной карты размахов соответственно; A_2, D_4, D_3 – константы для построения контрольных границ для средних и размахов, зависящие от количества измерений в одном цикле измерений.

Полученные результаты заносятся в «Контрольную карту средних и размахов» (рис. 1), а линии среднего значения измеряемого параметра, среднего размаха, контрольных границ наносятся на «График средних и размахов» (рис. 2).

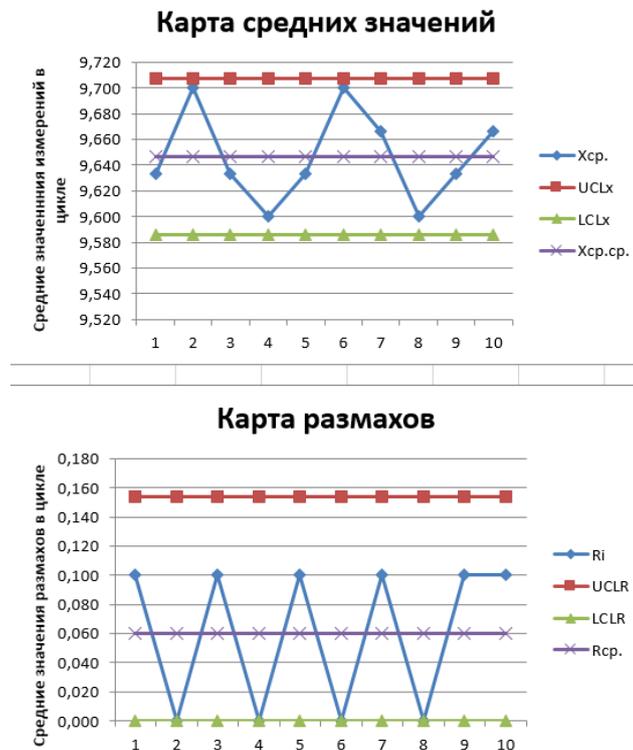


Рис. 2. График средних и размахов

Для оценки стабильности сначала проводится анализ карты размахов. В приведенном примере процесс считается стабильным, так как все нанесенные точки находятся в пределах контрольных границ, отсутствуют серии точек по одну сторону от среднего значения, наличие тренда не наблюдается, отсутствуют группы точек около линии средних и около контрольных границ¹.

По тем же параметрам, применяемым для оценивания стабильности карты размахов, проводится оценка карты средних значений.

Если анализ «Контрольной карты средних и размахов» показывает, что измерительный процесс стабилен и находится в управляемом состоянии, проводятся дальнейшие исследования

¹ ГОСТ Р 51814.3–2001. Системы качества в автомобилестроении. Методы статистического управления процессами. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026563>

измерительного процесса. В рассмотренном случае измерительный процесс стабилен и находится в управляемом состоянии, поэтому можно проводить дальнейшие исследования измерительного процесса.

В случае нестабильности измерительного процесса специалистом проводятся дополнительные исследования причин изменчивости процесса в соответствии с рекомендациями раздела 11 ГОСТ Р 51814.5–2005¹.

После устранения особых причин изменчивости и снижения влияния обычных причин изменчивости проводят повторные исследования стабильности измерительного процесса.

Оценка смещения и линейности смещения измерительного процесса

Смещение измерительного процесса оценивается как разность между средним значением результатов многократных измерений и предполагаемым истинным значением измеряемого параметра [1]. Проводят по 10 измерений, результаты которых заносятся в «Контрольный лист данных для расчета смещения измерительного процесса».

За предполагаемое истинное значение $X_{ист.}$ берется среднее значение измерений. Далее рассчитываются среднее значение результатов измерений, абсолютное значение смещения измерительного процесса и относительное значение смещения измерительного процесса. Полученный результат считается приемлемым, если смещение составляет менее 10 %.

Для оценки линейности смещения измерительного процесса берется пять образцов проверяемых изделий, по каждому из которых проводится по 10 измерений. Далее рассчитываются для каждого образца показатели, которые находили при оценке смещения измерительного процесса. Кроме этого, вычисляются коэффициент корреляции, коэффициенты уравнения линии регрессии, абсолютное и относительное значения линейности измерительного процесса. Все измерения и расчеты заносятся в «Контрольный лист данных для расчета линейности смещения измерительного процесса» (рис. 3), а линию регрессии наносят на «График линейности смещения измерительного процесса» (рис. 4).

Контрольный лист для расчета смещения измерительного процесса

Радиостанция	Р.ЛСМ-10-30										
Измеряемый параметр:	Мощность несущей частоты передатчиков					Единицы измерения: ВТ					
Истинное значение:	9,66	Верхняя граница допуска, USL:				11,0	Нижняя граница допуска, LSL:				9,0
Средство измерения:	Анализатор системы связи R8000B					Номер СИ					800LQW0012
№ образца	1										
Количество измерений в цикле, Q:	10										
Количество операторов, M:	1										
Результаты измерений образца специалистом:											
№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Значения, X	9,700	9,700	9,600	9,600	9,700	9,700	9,600	9,600	9,700	9,700	
$X_{ист.} =$	9,660										
Результаты измерений образца оператором:											
№ измерения	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Значения, X	9,600	9,700	9,600	9,600	9,600	9,700	9,700	9,600	9,600	9,600	
$X_{ф.}$	9,630	среднее результатов измерения									
B	-0,030	абсолютное смещения измерительного процесса									
%B	1,500	относительное смещения измерительного процесса									

Рис. 3. Контрольный лист для расчета смещения измерительного процесса

¹ ГОСТ Р 51814.5–2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200039941>

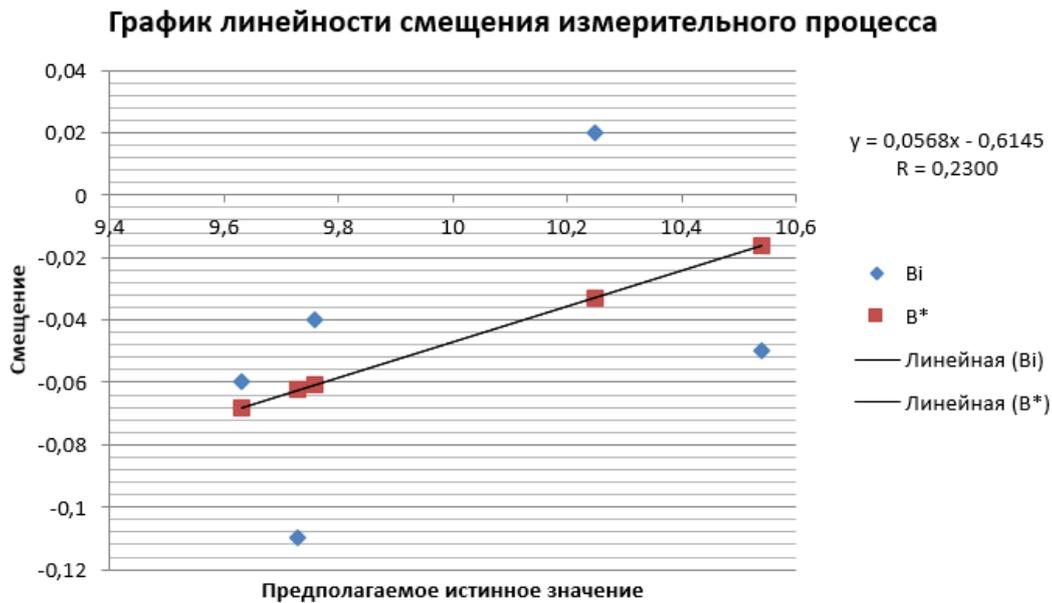


Рис. 4. График линейности смещения измерительного процесса

За предполагаемое истинное значение $X_{\text{ист.}}$ берется среднее значение измерений, полученных специалистом:

$$X_{\text{ист.}} = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q X_k.$$

Далее рассчитываются следующие показатели: среднее значение результатов измерений, выполненных оператором $X_{\text{сп.}}$, абсолютное значение смещения измерительного процесса B , относительное значение смещения измерительного процесса $\%B$.

Для этого применяются следующие формулы:

$$X_{\text{сп.}} = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q X_k;$$

$$B = X_{\text{сп.}} - X_{\text{ист.}};$$

$$\%B = \frac{|B|}{USL - LSL} 100,$$

где USL , LSL – верхняя и нижняя границы допуска на измеряемый параметр.

По окончании измерений массив данных должен содержать ровно Q повторных измерений образца, в котором каждое значение X_k – результат k -го измерения образца (индекс k – номер измерения образца от 1 до Q). Полученный результат $\%B$ считается приемлемым, если составляет менее 10 %, в приведенном примере $\%B = 1,50\%$ ¹.

В качестве характеристики линейности смещения процесса измерения рассматривают величину наклона прямой, которая наилучшим образом аппроксимирует зависимость средних значений смещения для различных образцов от их предполагаемых истинных значений, при этом предполагаемые истинные значения испытываемых образцов должны представлять все возможные значения измеряемого параметра для данного измерительного процесса, а также быть равномерно распределены по всему рабочему диапазону.

Для оценки линейности смещения измерительного процесса берется пять изделий ($N = 5$), по каждому из которых проводится по 10 измерений ($Q = 10$), при этом образцы выбираются в случайном порядке. Массив данных содержит Q повторных измерений каждого из N образцов,

¹ ГОСТ Р 51814.5–2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200039941>

в котором каждое значение X_{ik} – результат k -го измерения i -го изделия (i – его номер от 1 до N , k – номер каждого измерения от 1 до Q).

Далее для каждого образца рассчитываются предполагаемые истинные значения $X_{ист.i}$ измеряемых параметров по формуле (1), а также среднее значение для каждого образца:

$$X_{cp.i} = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q X_{ik},$$

где X_{ik} – результат k -го измерения параметра i -го образца изделия.

Затем вычисляется абсолютное значение смещения измерительного процесса для каждого из образцов по формуле

$$B_i = X_{cp.i} - X_{ист.i},$$

где $X_{ист.i}$ – предполагаемое истинное значение измеряемого параметра i -го образца; B_i – смещение при измерении параметра i -го образца.

Кроме этого, вычисляется коэффициент корреляции R , коэффициенты уравнения линии регрессии B^* , абсолютное L и относительное $\%L$ значения линейности измерительного процесса:

$$R = \frac{N \sum_{i=1}^N (X_{ист.i} B_i) - \sum_{i=1}^N X_{ист.i} \sum_{i=1}^N B_i}{\sqrt{\left[N \sum_{i=1}^N (X_{ист.i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N X_{ист.i} \right)^2 \right] \left[N \sum_{i=1}^N B_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N B_i \right)^2 \right]}};$$

$$B^* = aX_{ист.} + b,$$

где B^* – значение смещения, полученное с помощью уравнения регрессии; a , b – коэффициенты уравнения линии регрессии, получаемые по формулам

$$a = \frac{N \sum_{i=1}^N (X_{ист.i} B_i) - \sum_{i=1}^N X_{ист.i} \sum_{i=1}^N B_i}{N \sum_{i=1}^N (X_{ист.i})^2 - \left(\sum_{i=1}^N X_{ист.i} \right)^2};$$

$$b = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N B_i - a \sum_{i=1}^N X_{ист.i} \right);$$

$$L = a(UL - LL);$$

$$\%L = \frac{|L|}{UL - LL} 100 ,$$

где UL , LL – верхняя и нижняя границы рабочего диапазона измерительного процесса соответственно.

Все измерения и расчеты заносятся в «Контрольный лист данных для расчета линейности смещения измерительного процесса» (рис. 5).

Считается, что при значениях коэффициента корреляции в диапазоне $0 \div 0,5$ линейная связь между величинами практически отсутствует (изменение смещения в пределах рабочего диапазона нелинейно); в пределах $0,5 \div 0,75$ линейная связь между величинами слабая (изменение смещения в пределах рабочего диапазона нельзя считать линейным); в диапазоне $0,75 \div 0,90$ линейная связь между величинами средняя (изменение смещения в пределах рабочего диапазона можно считать линейным); в пределах $0,90 \div 1$ линейная связь между величинами сильная (изменение смещения в пределах рабочего диапазона линейно) [3].

В примере линейная связь между предполагаемым истинным значением измеряемого параметра и соответствующими смещениями измерительного процесса практически отсутствует (коэффициент корреляции $R^2 < 0,5$) [1], т.е. изменение смещения в пределах рабочего диапазона нелинейно. Относительное значение линейности смещения измерительного процесса $\%L$ считается приемлемым, поскольку не превышает 10 % [1].

Контрольный лист для расчета линейности смещения измерительного процесса

Радиостанция	РЛСМ-10-30			Единицы измерения:	ВТ
Измеряемый параметр:	Мощность несущей частоты передатчиков	Верхняя граница допуска, USL:	11,0	Нижняя граница допуска, LSL:	9,0
Норма для радиостанции:	10,0	Анализатор системы связи R8000B		Номер СИ	800LQW0012
Средство измерения:					
Количество образцов, N :	5				
Количество попыток, Q :	10				
Количество операторов, M :	1				

Результаты измерений образцов специалистом:

Попытка	№ Образца					Сумма
	1	2	3	4	5	
1	9,8	9,8	10,5	9,6	10,2	
2	9,8	9,7	10,5	9,6	10,2	
3	9,8	9,7	10,5	9,6	10,3	
4	9,6	9,7	10,5	9,7	10,3	
5	9,7	9,8	10,6	9,7	10,2	
6	9,7	9,8	10,6	9,6	10,3	
7	9,7	9,8	10,5	9,6	10,2	
8	9,8	9,8	10,5	9,6	10,2	
9	9,7	9,8	10,6	9,7	10,3	
10	9,7	9,7	10,6	9,6	10,3	
$X_{ист.}$	9,73	9,76	10,54	9,63	10,25	49,91

Результаты измерений образцов оператором и расчеты:

Попытка	№ Образца					Сумма
	1	2	3	4	5	
1	9,6	9,8	10,5	9,5	10,2	
2	9,6	9,7	10,4	9,6	10,2	
3	9,6	9,7	10,5	9,6	10,3	
4	9,6	9,8	10,5	9,7	10,2	
5	9,6	9,8	10,4	9,6	10,2	
6	9,7	9,8	10,5	9,6	10,3	
7	9,7	9,7	10,5	9,5	10,3	
8	9,6	9,7	10,5	9,5	10,3	
9	9,6	9,6	10,6	9,5	10,3	
10	9,6	9,6	10,5	9,6	10,4	
X_{cp}	9,62	9,72	10,49	9,57	10,27	

Рис. 5. Контрольный лист для расчета линейности смещения измерительного процесса

Оценка сходимости и воспроизводимости результатов измерений

Сходимость результатов измерений отражает 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. Воспроизводимость результатов измерений показывает близость результатов измерений одного и того же измеряемого параметра, выполненных при измененных условиях измерений.

Для оценивания сходимости и воспроизводимости используется метод средних и размахов. Для эксперимента отбирается 10 изделий ($N = 10$). Три оператора ($M = 3$) поочередно выполняют измерения всех образцов. Измерение одного образца каждым оператором повторяется 3 раза ($Q = 3$).

По окончании эксперимента массив данных содержит ровно Q повторных измерений каждого из N образцов каждым из M операторов, в котором каждое значение X_{ijk} – результат k -го измерения i -го образца j -м оператором, где i – номер образца от 1 до N , j – номер оператора от 1 до M , k – номер измерения каждого образца каждым оператором от 1 до Q .

Полученные данные и предварительные расчеты заносятся в табл. 1 «Контрольный лист данных для расчета сходимости и воспроизводимости измерительного процесса».

Таблица 1

Контрольный лист данных для расчета сходимости и воспроизводимости измерительного процесса

Операторы и попытки		Порядковые номера										Средние и размахи
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Оператор 1:	1											
	2											
	3											
Среднее		(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(4)
Размах		(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(5)
Оператор 2:	1											
	2											
	3											
Среднее		(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(4)
Размах		(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(5)
Оператор 3:	1											
	2											
	3											
Среднее		(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(4)
Размах		(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(3)	(5)
Среднее		(6)	(6)	(6)	(6)	(6)	(6)	(3)	(6)	(6)	(6)	(7)
R_p		(8)										
$R_{cp.}$		(9)										
R_o		(10)										

Проводятся следующие предварительные расчеты [1]:

1) для каждого образца высчитывается среднее значение $X_{cp.ij*}$ и размах результатов R_{ij} его измерений каждым из операторов:

$$X_{cp.ij*} = \frac{1}{Q} \sum_{k=1}^Q X_{ikj}; \tag{2}$$

$$R_{ij} = \max_{k=1, Q} (X_{ijk}) - \min_{k=1, Q} (X_{ijk}). \tag{3}$$

Результаты измерений и расчетов вносятся в соответствующие ячейки (2) и (3) табл. 1, обозначенные по номерам формул;

2) для каждого оператора рассчитывается среднее значение $X_{cp.*j*}$ и средний размах $R_{cp.*j}$ результатов его измерений:

$$X_{cp.*j*} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{cp.ij*}; \tag{4}$$

$$R_{cp.*j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_{ij}. \tag{5}$$

Результаты вносятся в соответствующие ячейки (4) и (5) табл. 1;

3) для каждого образца вычисляется среднее значение результатов его измерений всеми операторами $X_{cp.i**}$:

$$X_{cp.i**} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M X_{cp.ij*}. \tag{6}$$

Расчеты средних заносят в соответствующие ячейки (6) табл. 1;

4) находится среднее значение всех результатов измерений образцов $X_{cp.***}$:

$$X_{\text{cp.***}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{\text{cp.i***}} \quad (7)$$

Результаты расчетов вносятся в соответствующие ячейки (7) табл. 1;

5) определяется размах значений параметра образцов R_p , средний размах всех измерений $R_{\text{cp.}}$, размах между измерениями операторов R_o :

$$R_p = \max_{i=1, N} (X_{\text{cp.i**}}) - \min_{i=1, N} (X_{\text{cp.i**}}); \quad (8)$$

$$R_{\text{cp.}} = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M R_{\text{cp.*j}}; \quad (9)$$

$$R_o = \max_{j=1, M} (X_{\text{cp.*j*}}) - \min_{j=1, M} (X_{\text{cp.*j*}}). \quad (10)$$

Результаты вносятся в соответствующие ячейки табл. 1.

Полученные результаты применяются для последующих расчетов среднеквадратических отклонений (СКО) и составляющих изменчивости измерительного процесса. Рассчитываются:

1) оценка СКО сходимости (повторяемости) измерительного процесса S_e :

$$S_e = \frac{R_{\text{cp.}}}{D_2},$$

где D_2 – константа для вычисления СКО с помощью размаха¹.

При выборе константы D_2 для расчета сходимости принимают $H = Q$ и $G = M * N$;

2) оценка СКО воспроизводимости (изменчивости от оператора) измерительного процесса S_o :

$$S_o = \sqrt{\left[\frac{R_o}{D_2} \right]^2 - \left[\frac{S_e^2}{NQ} \right]},$$

где D_2 – константа для вычисления СКО с помощью размаха.

При выборе константы D_2 для расчета воспроизводимости принимают $H = M$ и $G = 1$.

Если под радикалом окажется отрицательное число, $S_o = 0$;

3) оценка СКО изменчивости образца измерительного процесса S_p :

$$S_p = \frac{R_p}{D_2},$$

где D_2 – константа для вычисления СКО с помощью размаха.

При выборе константы D_2 для расчета воспроизводимости принимают $H = N$ и $G = 1$;

4) составляющие изменчивости:

– сходимость EV результатов измерений (повторяемость):

$$EV = K_\alpha S_e;$$

– воспроизводимость AV результатов измерений (изменчивость от операторов):

$$AV = K_\alpha S_o;$$

– сходимость и воспроизводимость $R \& R$ результатов измерений:

$$R \& R = \sqrt{EV^2 + AV^2};$$

¹ ГОСТ Р 51814.5–2005. Системы менеджмента качества в автомобилестроении. Анализ измерительных и контрольных процессов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200039941>

- изменчивость PV образцов:

$$PV = K_{\alpha} S_p ;$$

- полная изменчивость TV измерительного процесса:

$$TV = \sqrt{R \& R^2 + PV^2} ,$$

где K_{α} – определяют исходя из уровня значимости и таблицы значений функции Лапласа. Для рекомендуемого уровня значимости $\alpha = 0,99$ значение $K_{\alpha} = 5,15$; S_o – СКО анализируемой составляющей изменчивости.

5) относительные значения составляющих изменчивости (сходимость, воспроизводимость, изменчивость образца, взаимодействие оператора и образца) по формулам:

$$\%EV_{TV} = \frac{EV}{TV} 100 ,$$

$$\%AV_{TV} = \frac{AV}{TV} 100 ,$$

$$\%PV_{TV} = \frac{PV}{TV} 100 .$$

При подстановке в приведенные формулы вместо полной изменчивости TV измерительного процесса величины допуска $USL - LSL$ получают относительную изменчивость составляющих процесса относительно допуска.

Оценка приемлемости измерительного процесса

Анализ приемлемости измерительного процесса состоит в сравнении сходимости и воспроизводимости с допуском на измеряемый параметр $\%R\&R_{SL}$ или полной изменчивостью измеряемого параметра образца $\%R\&R_{TV}$. В приведенном примере измерительный процесс считается приемлемым, поскольку эти значения не превышают 10 % (табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчетов для рассмотренного примера

Характеристика	Значение характеристики	Допускаемый предел характеристики	Вывод о приемлемости
1. Стабильность	–	–	Приемлемо
2. Смещение, $\%B$	1,5 %	≤ 10 %	Приемлемо
3. Линейность, $\%L$	5,7 %	≤ 10 %	Приемлемо
4. Сходимость и воспроизводимость:			
– $\%R\&R_{SL}$;	8,7 %	≤ 10 %	Приемлемо
– $\%R\&R_{TV}$	8,3 %	≤ 10 %	Приемлемо

В табл. 2 отображены результаты расчетов всех характеристик анализируемого измерительного процесса с оценкой его приемлемости.

Заключение

По результатам анализа для приведенного примера проверки железнодорожных радиостанций все характеристики измерительного процесса были признаны приемлемыми.

На измерительный процесс оказывает влияние очень много факторов: образцы измерений, индивидуальные особенности операторов, средства измерений, методы измерений, окружающая среда [3]. Анализ измерительного процесса помогает выявить взаимосвязи между этими факторами [1].

Список литературы

1. Прокопчук С. П., Цыпин Б. В. Анализ измерительного процесса при технологической проверке железнодорожных радиостанций // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 1. С. 423–426.
2. ООО КБ «ПУЛЬСАР-ТЕЛЕКОМ». URL: <https://www.pulsar-telecom.ru/catalog>
3. Рихтер Е. В. Анализ измерительных систем // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 2, № 12. С. 199–201. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-izmeritelnyh-sistem>

References

1. Prokopchuk S.P., Tsy-pin B.V. Analysis of the measuring process during technological verification of the same forest-road radio stations. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;1:423–426. (In Russ.)
2. ООО КБ «PUL"SAR-TELEKOM» = KB LLC "PULSAR-TELECOM". (In Russ.). Available at: <https://www.pulsar-telecom.ru/catalog>
3. Rikhter E.V. Analysis of measuring systems. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavtiki = Actual problems of aviation and cosmonautics*. 2016;2(12):199–201. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-izmeritelnyh-sistem>

Информация об авторах / Information about the authors**Борис Вульфович Цыпин**

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры ракетно-космического
и авиационного приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tsy-pin@yandex.ru

Boris V. Tsy-pin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of space-rocket
and aviation instrument making,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Светлана Павловна Прокопчук

магистрант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sunfil@yandex.ru

Svetlana P. Prokopchuk

Master degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 11.07.2024

Поступила после рецензирования / Revised 05.08.2024

Принята к публикации / Accepted 02.09.2024