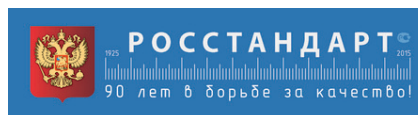
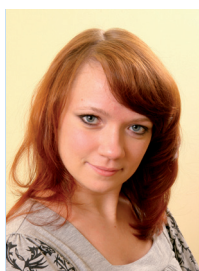


## 90-летию Росстандарта посвящается



**Владимир Валерьянович  
ТОЛМАЧЕВ,**  
к.ф.-м.н., заведующий лабораторией, Федеральное государственное унитарное предприятие «Уральский научно-исследовательский институт метрологии»



**Илона Николаевна  
МАТВЕЕВА,**  
научный сотрудник, Федеральное государственное унитарное предприятие «Уральский научно-исследовательский институт метрологии»



**Анастасия Андреевна  
ЗАБЕЛИНА,**  
инженер, Федеральное государственное унитарное предприятие «Уральский научно-исследовательский институт метрологии»

## РОЛЬ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В ПОВЫШЕНИИ НАДЕЖНОСТИ КРЕПЕЖНОЙ ПРОДУКЦИИ

**Ключевые слова:** оценка соответствия, неопределенность измерений, гарантированная надежность, риск потребителя, интервал принятия.

*Предметом статьи является рассмотрение решения задачи о повышении надежности крепежной продукции на основании анализа и оценки рисков решения о соответствии продукции. Показано, что ключевыми параметрами, от которых зависит гарантированная надежность крепежной продукции, являются оценка неопределенности измерений системы контроля и испытаний и оценка вариации технологического процесса изготовителя.*

Повышение качества продукции машиностроения неразрывно связано с повышением ее надежности, т.е. свойством сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [1].

Современная тенденция снижения материалоемкости продукции приводит к необходимости разработки изделий с уменьшенными коэффициентами запаса, т.е. снижением их надежности,

что является неприемлемым для потребителя, которому необходима продукция гарантированного качества.

Изготовитель, как правило, использует результаты контроля и (или) испытаний, для признания продукции соответствующий требованиям потребителя. Контроль, осуществляемый изготовителем за продукцией перед выпуском ее на рынок, является частным видом оценки соответствия [2]. При оценке соответствия продукции подразумевается, что заключение об ее соответствии заданным требованиям опирается

на измерение или испытание в качестве основного источника информации.

При измерениях, выполняемых для оценки соответствия, знания о свойстве, представляющем интерес (измеряемая величина), моделируются с помощью условной функции плотности вероятности, форма которой зависит от системы контроля и испытаний (СКИ) изготовителя (квалификации персонала, точности средства измерений, методики измерений, условий измерений). Математически функция плотности вероятности, кодирующая знание о возможных значениях измеряемой величины, может быть представлена в виде наилучшей оценки (принятой в качестве фактического значения измеряемой величины) вместе с соответствующей неопределенностью измерений или граничным интервалом, который содержит значения измеряемой величины с установленной вероятностью охвата.

Международное бюро мер и весов на основе анализа и оценки рисков вероятностных распределений, отражающих неопределенность и неполноту измерительной информации, рекомендует разделить принятие решения о соответствии на основе результатов измерений [3] на три последовательных действия:

- ♦ измерить интересующее свойство продукции (измерение);
- ♦ сравнить результат измерения с предельным значением (сравнение);
- ♦ принять решение о последующих действиях (решение).

Операции сравнение/решение, как правило, реализуют с использованием ранее установленного и утвержденного правила принятия решений, которое зависит от результата измерения, заданных требований и тяжести последствий неправильного решения.

Рассмотрим задачу оценки соответствия предоставляемой потребителю партии продукции на примере болтов из углеродистой стали класса прочности 8.8 номинальным диаметром резьбы  $d=14$  мм с мелким шагом резьбы. Основным показателем надежности для метизов является долговечность - свойство изделия сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния, т.е. заданные минимально допустимые механические свойства.

Как правило, представитель потребителя принимает решение о соответствии продукции после сравнения результатов, полученных в

процессе измерений ее характеристик, с нормами, установленными нормативной документацией (технические условия или стандарты) на продукцию. По умолчанию стороны используют правило принятия решений «простое соответствие», не учитывая неопределенность результатов измерений. При таком подходе продукцию принимают как соответствующую (и отвергают в противном случае), если значение измеренного свойства находится в допустимом интервале. Используя правило принятия решений «простое соответствие», стороны делят последствия неправильных решений.

Из-за неопределенности результатов измерений всегда есть риск неправильного решения признать продукцию соответствующей заданным требованиям на основе измеренного (фактического) значения свойства. Возможны два типа неправильных решений: принять продукцию соответствующую, хотя на самом деле она может быть несоответствующей, и отклонить продукцию как несоответствующую, хотя она на самом деле может быть соответствующей.

Если измеренное (фактическое) значение свойства продукции лежит достаточно близко к границе допустимого интервала (предельному значению), то в этом случае около 50% функции плотности вероятности для измеряемой величины будет лежать по обе стороны от границы, как следствие, решение «простое соответствие» будет с 50%-ной вероятностью неправильным решением о принятии или отклонении продукции.

Как видно из таблицы 1, измеренные фактические значения характеристик продукции лежат в допустимых интервалах. Правило принятия решения «Простое соответствие» приводит к выводу о соответствии партии продукции. Однако, если измеренные (фактические) значения находятся достаточно близко к границе допустимого интервала (по сравнению с неопределенностью результата измерения), то использование правила принятия решений «простое соответствие» для измеряемой величины, имеющей в общем случае симметричную унимодальную функцию плотности вероятности (такая, как нормальное распределение), может привести к ситуации, когда вероятность принятия несоответствующей продукции или отклонения соответствующей продукции может достигать 50%.

Любая из этих вероятностей может быть уменьшена за счет увеличения другой путем вы-

**Таблица 1.** Сравнение результатов оценки соответствия для правил  
«Простое соответствие» и «Гарантированное соответствие»

Измеряемая характеристика	Предельное значение	Измеренное (фактическое) значение	Расширенная неопределенность методики измерений	Сравнение и решение для правила «Простое соответствие»	Сравнение и решение для правила «Гарантированное соответствие»
Предел прочности на растяжение	не менее 800	807	10	807 > 800 соотв.	$\Phi\left(\frac{807 - 800}{5}\right) = 0,08 > 0,05$ не соотв.
Твердость по Виккерсу	не менее 250 не более 320	270	9	250 < 270 < 320 соотв.	$\Phi\left(\frac{320 - 270}{4,5}\right) - \Phi\left(\frac{270 - 250}{4,5}\right) = 0 < 0,05$ соотв.
Высота необезуглероженной зоны резьбы	не менее 0,307	0,317	0,012	0,317 > 0,307 соотв.	$\Phi\left(\frac{0,317 - 0,307}{0,006}\right) = 0,04 < 0,05$ соотв.
Глубина полного обезуглероживания в резьбе	не более 0,015	0,013	0,001	0,013 < 0,015 соотв.	$\Phi\left(\frac{0,015 - 0,013}{0,0005}\right) = 0,000003 < 0,05$ соотв.

бора пределов принятия, отличных от пределов допуска. Такую стратегию решения задачи соответствия можно идентифицировать как стратегию получения гарантированной надежности. Риск принятия несоответствующей продукции может быть уменьшен путем установления границы принятия  $A_U$  внутри допустимого интервала. Интервал  $[A_U, T_U]$ , определенный верхней границей  $A_U$  и границей принятия  $T_U$ , можно назвать защитным интервалом, а правило принятия решения – «гарантированное соответствие» (принятие на основе принципа защищенности [4, 5]).

Параметр размера защитного интервала обычно выражают через расширенную неопределенность методики измерений  $U$  (с коэффициентом охвата  $k=2$ ), используя множитель  $r$ , характеризующий минимальную вероятность соответствия, с которой продукция принимается

$$w = rU \quad (1)$$

Использование защитного интервала позволяет снизить вероятность принятия неправильного решения о соответствии на основании измерительной информации, представленной в виде интервала охвата. Параметр размера защитного

интервала  $r$  выступает одновременно как мерой гарантированной надежности от результатов недостоверных измерений, так и мерой жесткости системы приемки готовой продукции. Чем больше величина  $r$ , тем больше степень гарантированной надежности, и тем более жесткие требования к продукции предъявлены

Для реализации правила принятия решения «Гарантированное соответствие» необходимо рассчитать вероятность несоответствия продукции на основании результата измерения по формуле

$$P_C = \Phi(z) \quad (2)$$

где  $z = \frac{(y - T_L)}{U}$  для нижнего предела,

$z = \frac{(T_U - y)}{U}$  для верхнего предела,

$\Phi(z)$  – функция Лапласа,

а затем сравнить полученное значение с искомой вероятностью ошибочного решения (в рассматриваемом случае – 0,05 для всех характеристик продукции).

Чем ближе результат измерения находится к границе допустимого интервала, тем выше

вероятность того, что реальное значение искомой характеристики находится в зоне несоответствующих значений, тем выше вероятность принятия неправильного решения (так называемая ошибка 1 рода) при использовании правила «Простое соответствие».

Для использования правила «Гарантированное соответствие» при оценке партии продукции потребитель на основании информации о неопределенности испытаний должен установить величину защитного интервала с учетом приемлемого риска.

В таблице 2 приведены значения  $r$  для нескольких значений вероятности соответствия  $P_c$ . Видно, что если для обеспечения вероятности несоответствия 0,05 размер защитного интервала равен  $1,64U$ , т.е. граница интервала принятия должна быть установлена на расстоянии  $1,64U$  от границы поля допуска, то для обеспечения вероятности несоответствия 0,001 размер защитного интервала почти в два раза больше и равен  $3,09U$ . Таким образом, размер защитного интервала полностью зависит от вкладов в неопределенность измерений квалификации персонала, точности средства измерений, методики измерений, условий измерений — параметров, характеризующих качество системы контроля и испытаний.

**Таблица 2.** Вероятности соответствия  $P_c$  и несоответствия  $\bar{P}_c$  для одностороннего допускаемого интервала и нормальной функции плотности распределения

$P_c$	$\bar{P}_c$	$r$
0,80	0,20	0,84
0,90	0,10	1,28
0,95	0,05	1,64
0,99	0,01	2,33
0,999	0,001	3,09

Использование защитного интервала позволяет снизить вероятность принятия неправильного решения о соответствии на основании измерительной информации, представленной в виде интервала охвата. Однако, оценка вероятности принятия неправильного решения зависит от двух процессов, имеющих вероятностный характер: производственного процесса и процесса измерения. Поэтому, если речь идет об оценке соответствия серийно выпускаемой продукции, то для получения корректного результата следу-

ет учесть вероятностный характер производственного процесса.

Если результат измерений, полученный системой контроля и испытаний, обладает высокой точностью, все решения о соответствии будут правильными и все риски будут равны нулю. Увеличение неопределенности результата измерения означает увеличение вероятности неправильного решения. При этом максимальная вероятность несоответствия достигается при стремлении измеренного значения к допустимому пределу.

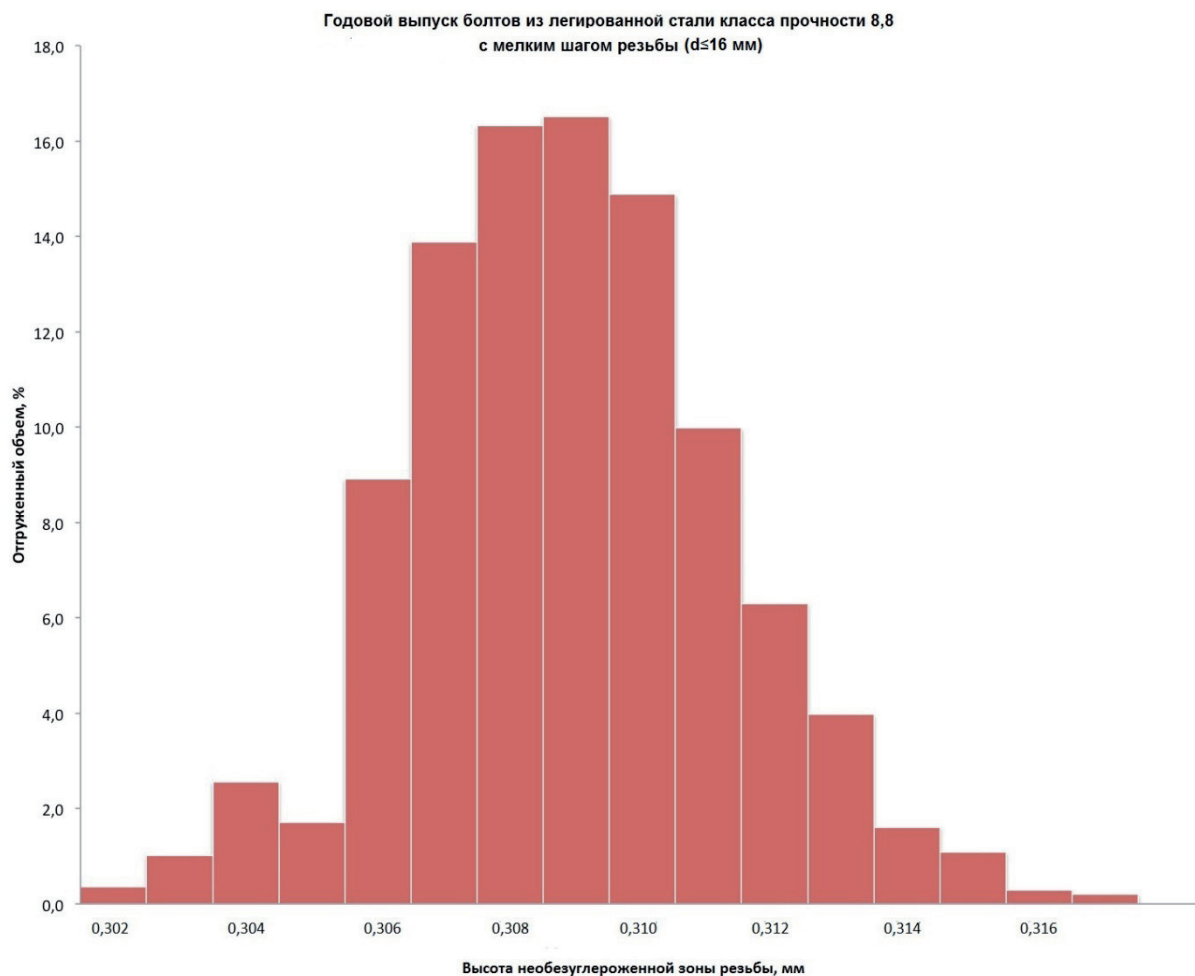
Если производственный процесс настроен корректно, находится в управляемом состоянии, то серийно выпускаемая продукция редко имеет значения свойств, близкие к допустимым пределам, и вероятность неправильного решения о соответствии, которое может быть сделано, мала. И наоборот, если процесс производит продукцию со свойствами, величины которых близки к допустимым пределам, начинают играть роль неопределенности, связанные с результатами измерений.

Установление границы принятия решения о соответствии является показателем гарантированной надежности. Изготовитель должен обеспечить величину риска не более допустимого с учетом вариаций характеристик продукции, обусловленных технологическим процессом и неопределенностью результата измерения искомой характеристики, определяемой методикой измерений.

Ключевой задачей обеспечения гарантированной надежности изделий является введение и использование обоснованных защитных границ при приемке готовой продукции.

Рассмотрим влияние производственного процесса на ширину защитного интервала на примере серийно выпускаемых болтов из углеродистой стали класса прочности 8.8. Гистограмма распределения показателя «высота необезуглероженной зоны резьбы» в течение года для различных партий болтов номинальным диаметром резьбы  $d \leq 16$  мм с мелким шагом резьбы приведена на рис. 1. Технологический процесс производства обеспечивает среднее значение 0,309 мм со среднеквадратическим отклонением 0,005 мм при допуске — более 0,307 мм. Расширенная неопределенность методики измерений составляет 0,012 мм.

Соотношение между величиной среднеквадратического отклонения вариации технологи-



**Рис. 1.** Гистограмма распределения высоты необуглероженной зоны резьбы в партиях отгруженных в 2014 году болтов из углеродистой стали класса прочности 8,8 номинальным диаметром резьбы мм с мелким шагом резьбы

ческого процесса и стандартной неопределенностью результата измерений составляет 1,33. Это означает, что прецизионность СКИ позволяет оценить наличие и величину вариаций технологического процесса, с учетом вклада неопределенности измерений.

Очевидно, что величина вариаций технологического процесса должна привести к увеличению защитной зоны, чтобы нежелательные последствия для потребителя были исключены.

Расчет риска потребителя  $R_C$  при различных значениях  $r$  от -1 до 1 осуществлялся путем численного интегрирования по формуле, полученной для случая нижнего предела из более общих формул [3]

$$R_C = \int_{-}^{T_L} \left( 1 - \Phi \left( \frac{A_L - \eta}{u_m} \right) \right) g_0(\eta) d\eta \quad (3)$$

где

$$g_0(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}u_0} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\eta - y_0}{u_0} \right)^2 \right] -$$

функция распределения плотности вероятности с переменной до измерения измеряемой величины  $Y$ ;

$y_0$  – ожидание  $Y$  до выполнения измерения;

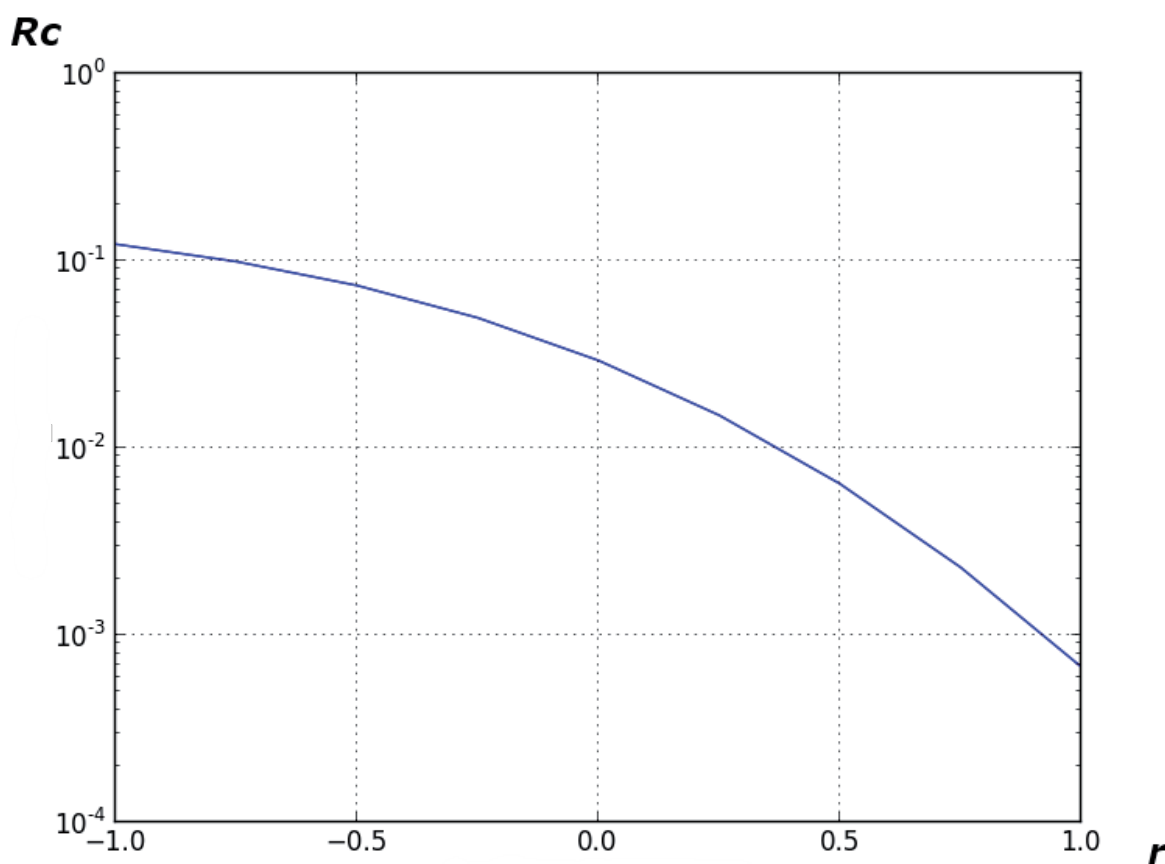
$u_0$  – стандартная неопределенность, связанная с оценкой  $y_0$  измеряемой величины  $Y$  до выполнения измерения;

$A_L$  – нижняя граница принятия;

$T_L$  – нижняя допустимая граница;

$u_m$  – стандартная неопределенность, связанная с измеренным значением величины  $m$ , когда априорные знания о значении измеряемой величины отсутствуют.

Результаты расчетов представлены на рис. 2. Случай  $r = 0$  соответствующий правилу «про-



**Рис. 2.** График зависимости риска потребителя  $P_c$  от параметра размера защитного интервала  $r$  (график защищенности потребителя)

стое соответствие» (отсутствие защитного интервала), обеспечивает риск потребителя 3%. Введение защитного интервала и установление границы принятия на уровне 0,308% ( $r = 3$ ) приводит к повышению надежности изделия путем снижения риска менее чем до 0,1% («гарантированное соответствие»). Если же границу интервала принятия установить на уровне 0,296% ( $r = -1$ ), то риск потребителя получить несоответствующую продукцию по показателю «высота необезуглероженной зоны резьбы» составит более 10% (низкая надежность).

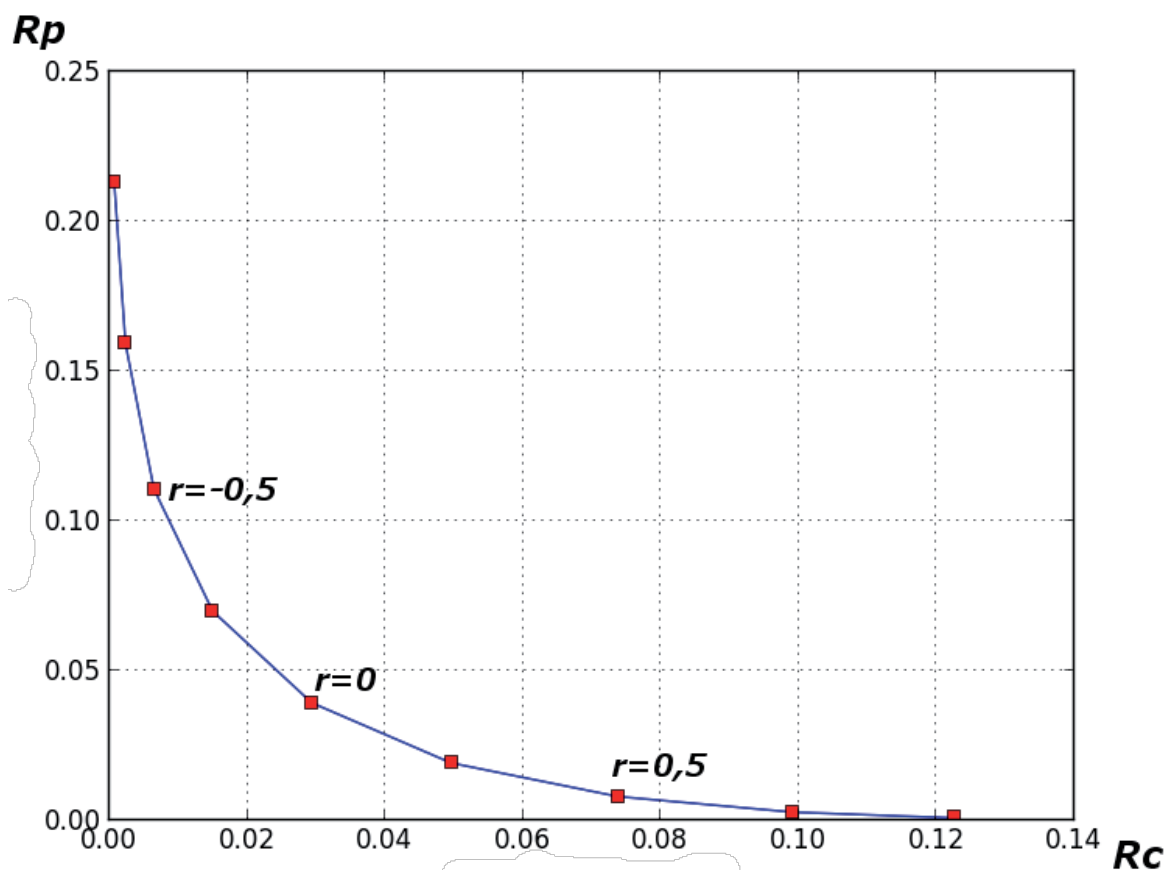
Введение границ принятия, отличающихся от границ интервала допускаемых значений, является необходимым условием применения принципа гарантированной надежности. Величина риска потребителя устанавливается либо законодательным путем в технических регламентах, либо по договоренности между изготовителем и потребителем.

Отрицательной стороной уменьшения риска потребителя является увеличение риска изготовителя. На рис. 3 приведены рассчитанные

численно риски изготовителя и потребителя для высоты необезуглероженной зоны резьбы при изменении параметра размера защитного интервала от -1 до +1. Для нахождения консенсуса, выгодного обеим сторонам, следует учитывать, что риск, помимо вероятности реализации события, содержит оценку тяжести последствий данного события. Учет экономической составляющей установления величины защитного интервала позволяет решить, что выгоднее потребителю — максимально минимизировать, вплоть до полного исключения, вероятность поставки несоответствующей продукции, но при высокой цене, куда будет входить и стоимость забракованной продукции, либо за те же деньги получать больший объем продукции, содержащей партии с несоответствующими значениями показателей.

Резюмируя вышесказанное, можно предложить следующий алгоритм для оценки степени гарантированной надежности, обеспечиваемой изготовителем продукции:

- ♦ анализ статистических данных изготовителя по показателям надежности с целью уста-



**Рис. 3.** Связь между рисками изготовителя  $R_p$  и потребителя  $R_c$  для значений параметра размера защитного интервала  $r$  от  $-1$  до  $+1$ .

новления степени близости вариаций технологического процесса к границам допуска;

- ♦ анализ системы контроля и испытаний изготовителя с целью установления значений неопределенности результатов испытаний, обеспечиваемых его СКИ и достоверности контроля вариаций технологического процесса;

- ♦ расчет и анализ рисков потребителя с целью контроля правильности установления защитных границ.

Выводы:

Для обеспечения защищенности от последствий недостоверных результатов измерений с целью гарантии надежности серийно выпускаемой продукции следует выполнять следующие операции:

1. На основе информации о неопределенности измерений  $U$  используемой методики измерений установить границы интервала принимаемых значений ( $T_L + U, T_U - U$ )

2. На основе информации о вариациях технологического процесса ( $\pm 3\sigma$ ) установить ве-

личину вероятности возникновения характеристик продукции, способных превышать интервал принимаемых значений  $T_L + U, T_U - U$ .

3. При отличной от нуля вероятности выхода характеристик продукции за интервал принимаемых значений вследствие вариаций технологического процесса, рассчитать увеличенную величину защитного интервала для риска, установленного законодательно (для технических регламентов) или заданного потребителем в виде гарантии надежности.

#### Литература

1. ГОСТ 27.002-89 Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения
2. ISO/IEC 17000:2004 Оценка соответствия. Словарь и общие принципы
3. JCGM 106:2012 Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment
4. Махутов Н. А., Резников Д. О. Сопоставительная оценка нормативного и основанного на управлении риском подходов к оценке защищенно-

сти сложных технических систем. Проблемы машиностроения и надежности машин №6, 2011

5. Махутов Н. А., Резников Д. О., Петров В. П., Куксова В. И. Нормативные подходы к обеспечению защищенности критически важных

объектов. Безопасность в техносфере, № 4 (июль–август), 2011.

© Толмачев В. В., Матвеева И. Н.,  
Забелина А. А.

**V. V. TOLMACHEV,**

*Candidate of Physico-mathematical Sciences, Head of the Laboratory, Federal State Unitary Enterprise Ural Research Institute for Metrology.*

**I. N. MATVEEVA,**

*researcher, Federal State Unitary Enterprise Ural Research Institute for Metrology.*

**A. A. ZABELINA,**

*engineer, Federal State Unitary Enterprise Ural Research Institute for Metrology*

## **METROLOGICAL ASPECTS OF SOLVING THE PROBLEM OF THE CONFORMITY OF PRODUCTS**

*The subject of the article is to consider solving the problem of improving the reliability of fastening products on the basis of risk analysis and assessment on the conformity of products. It is shown that the key parameters that affect the guaranteed reliability of fixing products are estimating uncertainty of measurement and control system testing and evaluation process variation manufacturer.*

**Keywords:** *Conformity assessment, measurement uncertainty, security, consumer's risk, acception interval.*