

Руководство по выражению неопределённости измерения: проблемы, нереализованные возможности и ревизия.

Ч. 1. Терминологические проблемы

С. Ф. ЛЕВИН

Московский институт экспертизы и испытаний, Москва, Россия,
e-mail: AntoninaEL@rostest.ru

Рассмотрена проблема несоответствия положений Руководства по выражению неопределённости измерения и Государственной системы обеспечения единства измерений. Представлены возможные варианты согласования положений этих документов в зависимости от цели решаемых измерительных задач.

Ключевые слова: метод косвенного измерения, композиционный подход, интерполяционная концепция вероятности, погрешность неадекватности, моментный подход, субъективная концепция вероятности, дефиниционная неопределённость.

Article is devoted a number of aspects for discrepancy problem of «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement» positions contrary to positions of the State system for ensuring the uniformity of measurements and possibilities of their coordination depending on the purpose of solved measuring problems.

Key words: method of indirect measurement, composite approach, interpolation concept of probability, inadequacy error, moment approach, subjective concept of probability, definition uncertainty.

По вопросу статистического оценивания точности в отечественной метрологии произошло нормативное разделение моментного и композиционного подходов. Исходные понятия моментного подхода, а также «неопределённость и прецизионность результатов измерений всякого рода» связаны с моментами распределений вероятностей, вводимых в рамках субъективной концепции Бернулли–Бейеса на основе метода моментов, предложенного К. Пирсоном. Выполненный в 1999 г. перевод на русский язык международного руководства «Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement» (GUM) [1] в рамках этой концепции с литературно-художественной точки зрения можно считать безупречным. Однако, несмотря на указание в аннотации о том, что «Руководство устанавливает общепринятые правила оценивания и выражения неопределённости в измерении», эти «общепринятые правила» вызвали в отечественном метрологическом сообществе множество вопросов [2–4]. И хотя превращение GUM в стандарт [5] произошло только в 2011 г., проблемы остались те же: несдержанные обещания простоты и понятности формулировок, терминология, использующая гиперболы и «синонимы», философские сентенции и, самое важное, формулировка цели основной измерительной задачи.

Согласно [5, п. 0.4], «...идеальный метод оценивания и выражения неопределённости измерения должен предоставлять возможность указать такой интервал, в частности, который был бы действительно близок к доверительному интервалу с заданным уровнем доверия». И главное: «надлежащей мерой неопределённости результата измерения является не дисперсия наблюдаемой величины, а дисперсия среднего арифметического по выборке наблюдений. Необходимо четко различать дисперсию случайной величины z и дисперсию её среднего арифметического значения $\bar{z}$ » [5, п. С.3.2].

Другими словами, речь шла не о распределении вероятностей возможных значений для измеряемой величины, а о распределении вероятностей возможных значений для оценки параметра положения распределения измеряемой величины.

В [6] по поводу аналогичного аутентичного перевода международного стандарта ISO 5725 на русский язык [7] указано: «Если разобраться, то неопределённость, английское слово *uncertainty* – это «прецизионность», которая в ГОСТ Р ИСО 5725 полностью раскрыта. Только нужно смотреть – в каких случаях что. В этом должны чётко разобраться метрологи». Судя по реакции на проект ревизии GUM [7], появившийся в 2014 г., метрологи, придерживающиеся моментного подхода, все еще разбираются...

Ещё до появления перевода [1] в [8] предложено «для тех видов и групп средств измерений, которые «вливаются» в поверочные схемы во главе с соответствующим государственным эталоном, сохранить полностью существующую терминологию, относящуюся к «погрешности измерений» и методам её определения». А «для тех видов и групп средств измерений, для которых отсутствуют государственные поверочные схемы и соответственно государственные эталоны, целесообразно использовать терминологию, связанную с понятием «неопределённости измерений» и разработать документацию, соответствующую Руководству и другим международным документам» [8].

18 декабря 2002 г. на Московском межфакультетском метрологическом семинаре МИЭИ внимание специалистов и преподавателей обращалось на декларирование во многих развитых странах за рубежом метрической системы и концепции неопределённости при фактическом её игнори-

ровании. «Эта концепция возникла как результат отсутствия государственных эталонов во многих областях измерений ряда зарубежных стран, что необходимость её использования ограничена сличениями исходных эталонов и что в учебных программах подготовки метрологов её роль не следует преувеличивать. Практическое внедрение концепции неопределённости потребует огромных и ничем не оправданных затрат на переработку нормативной документации, что негативным образом скажется на развитии отечественной метрологии» [9, 10].

Критической реакцией на перевод [1] была статья [11], в которой отмечались «условия» вступления России во Всемирную торговую организацию и «гармонизация» нормативных документов ГСИ (её перекося в 2002 г. осудил Учёный совет ВНИИМ имени Д. И. Менделеева). Из анализа, приведённого в [11], следовало, что переводу [1] не помешал бы профессиональный комментарий научного редактора.

Композиционный подход связан с композициями распределений вероятностей, вводимых для математических моделей объектов измерений в рамках интерполяционной концепции Гаусса–Фишера–Колмогорова [12–15] на основе метода функциональных преобразований распределений вероятностей К. Якоби [16]. Особенности композиционного подхода являются:

разделение понятий «вычисление» и «измерение» на основе принципа Пифагора путём уточнения термина «измерительная задача» как решаемой по данным измерений математической задачи, причём прообразом теории измерительных задач была фундаментальная монография Ю. В. Линника [17];

определение количественной меры вероятности согласия распределений и её связи с расстоянием Колмогорова между функциями распределения;

определение количественной меры погрешности неадекватности для математических моделей объектов измерений в схеме перекрёстного наблюдения;

контурное оценивание погрешности неадекватности конкурирующих непараметрических гипотез по статистикам Смирнова в логике статистического вывода.

Композиционный подход к оцениванию точности обсуждался в ходе общесоюзной дискуссии по проблемам применимости вероятностно-статистических методов, начатой в конце 1970-х гг. Ю. И. Алимовым и В. Н. Тутубалиным. Дискуссию продолжили В. В. Налимов, П. Е. Эльясберг, А. Ф. Фомин и Ф. П. Тарасенко, а за рубежом – Ф. Мостеллер, Дж. Тьюки, П. Хьюбер, И. Вучков и Ф. Хампель [13, 18]. Всесоюзная дискуссия была связана с вопросом А. Н. Колмогорова об объективном смысле вероятности: несмотря на то, что «основой применимости математической теории вероятностей к случайным явлениям реального мира является частотный подход к вероятности в той или иной форме... Тем не менее... частотный подход, основанный на понятии предельной частоты при стремящемся к бесконечности числе испытаний, не позволяет обосновать применимость результатов теории вероятностей к практическим задачам, в которых мы имеем дело с конечным числом испытаний...» [19].

По замечанию Б. В. Гнеденко, именно «наблюдения над статистической устойчивостью... послужили для построения теории вероятностей», которая «изучает лишь такие случайные события, в отношении которых имеет смысл не только утверждение об их случайности, но и возможна объективная оценка доли случаев их появления» [20].

Нормативная основа вероятностно-статистических методов после «катастрофического феномена 1985–1986 гг.» [18, 21] в ракетно-космической и авиационной технике (в основном американской), а также в ядерной энергетике и газопроводных системах, была нарушена. Из 31 стандарта по статистическим методам 24 были отменены, а стандарты по прикладной статистике – аннулированы. Восстановление нормативной базы началось в конце 1990-х гг., причём в ряде случаев за основу принимались международные стандарты по статистическим методам. В целом обновлённую нормативную основу композиционного подхода составили стандарты [22–27] и др.

Разделение подходов зафиксировано в стандарте [28, п. 7.1.2.]: «Для выработки требований к элементам метрологического обеспечения измерений следует использовать ... неопределённость по ГОСТ Р 54500.3, характеристики погрешности по МИ 1317 и РМГ 83, показатели ... прецизионности по ГОСТ Р ИСО 5725-1...». Но международные и национальные стандарты по статистическим методам в этот список не вошли, и нормативно ситуация стала многозначной: по одним и тем же данным измерений можно получить четыре разных результата и принять четыре разных решения, как оказалось, даже противоположных.

Одной из причин того, что «Руководство по выражению неопределённости измерения» осталось для многих метрологов «неприемлемой катахрезой», является осознанная или неосознанная терминологическая путаница близких по названиям понятий и терминов.

Доверительная вероятность, уровень доверия или вероятность охвата. В описанной выше проблеме центральным является термин *доверительная вероятность* – главный инструмент защиты «прав и законных интересов граждан, общества и государства от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений» согласно Федеральному закону РФ «Об обеспечении единства измерений». Нормы доверительной вероятности установлены государственными поверочными схемами. Встречаются термины *уровень доверия, вероятность охвата*:

«двусторонний доверительный интервал (*two-sided confidence interval*): Если T_1 и T_2 – две функции от наблюдаемых значений таких, что для оценки параметра распределения совокупности θ вероятность $\Pr [T_1 \leq \theta \leq T_2]$ равна $(1-\alpha)$, где $(1-\alpha)$ – константа, положительная и меньше 1, то интервал между T_1 и T_2 – это двусторонний доверительный интервал для θ при доверительной вероятности $(1-\alpha)$ » [29, п. 2.57];

«доверительная вероятность; *уровень доверия (confidence coefficient, confidence level)*: Величина $(1-\alpha)$ – вероятность, связанная с доверительным интервалом или со статистически покрывающим интервалом» [29, п. 2.59];

«толерантный интервал (*statistical coverage interval*): Ин-

тервал, для которого можно утверждать с данным уровнем доверия, что он содержит, по крайней мере, заданную долю определенной совокупности» [29, п. 2.61].

Однако согласно [5, п. 6.2.2] «...в настоящем *Руководстве* прилагательное «доверительный» применительно к интервалу, определяемому через U , и к вероятности нахождения измеряемой величины внутри этого интервала не используется. Вместо «доверительной вероятности» используется термин «уровень доверия». Более точно, U понимается как параметр, характеризующий интервал, в который попадает результат измерения и который содержит большую часть p распределения вероятностей, связанного с результатом измерения и его суммарной стандартной неопределённостью. При этом p является *вероятностью охвата* или *уровнем доверия* для этого интервала». Однако в [5, Приложение С] даны определения: «доверительная вероятность (*confidence coefficient, confidence level*): Значение $(1-\alpha)$ вероятности, связанной с доверительным интервалом или толерантным интервалом. Толерантный интервал (*statistical coverage interval*): Интервал, для которого можно утверждать с определенной доверительной вероятностью, что он содержит долю генеральной совокупности, не меньшую заданной».

В то же время согласно [30, п. 5.38.] «интервал охвата (*coverage interval*): Интервал, основанный на имеющейся информации, который содержит совокупность истинных значений измеряемой величины с заданной вероятностью.

Примечания.

1. Если результат измерения представлен плотностью распределения вероятностей на множестве возможных значений измеряемой величины, то для любого интервала значений может быть вычислена соответствующая вероятность. Наличие плотности распределения вероятностей позволяет для заданной вероятности определить интервал значений измеряемой величины...

2. Интервал охвата не следует отождествлять с «доверительным интервалом» во избежание путаницы с этим статистическим понятием».

В GUM используется также термин уровень доверия (*level of confidence*) [30]. Проясняет ситуацию энциклопедия: «Доверительный интервал (*confidence interval*) – интервал приближённых значений неизвестного скалярного параметра вероятностного распределения, построенный по результатам наблюдений. Пусть X – случайный элемент, принимающий значения в выборочном пространстве (F, B, P_θ) , $\theta \in \Theta \subset \mathbb{R}^1$. Далее, пусть $\theta^- = \theta^-(X)$ и $\theta^+ = \theta^+(X)$ такие две оценки параметра θ , что интервал $(\theta^-, \theta^+) \in \Theta$ и, кроме того, для любого $\theta \in \Theta$ определена вероятность $P_\theta\{\theta^- < \theta < \theta^+\} = p(\theta)$. Интервал (θ^-, θ^+) называется *доверительным интервалом* для параметра θ ; $p(\theta)$ называется *доверительной вероятностью*, или *вероятностью накрытия*, Д.и. (θ^-, θ^+) ; θ^- и θ^+ – нижняя и верхняя границы соответственно. Если доверительная вероятность $p(\theta)$ не зависит от θ , то в этом случае говорят, что Д.и. (θ^-, θ^+) подобен пространству выборок. Число $P = \inf_{\theta \in \Theta} p(\theta)$ называется коэффициентом доверия, или доверительным уровнем интервальной оценки» [31].

Другими словами, в математической статистике *доверительная вероятность* и *уровень доверия* – не являются синонимами. *Уровень доверия* – нижняя грань (*infimum*) доверительной вероятности, если $p(\theta)$ зависит от θ .

Реалистические или безопасные оценки. Согласно [5]: «Настоящим Руководством установлен широко применяемый метод оценивания ... неопределённости результата измерения. Этот метод обеспечивает получение не «безопасных» или «консервативных» (т. е. взятых с некоторым запасом), а реалистичных границ неопределённости... данный метод отличается от применявшихся ранее подходов, которые имели... два... представления. Первое представление заключалось в том, что неопределённость необходимо выражать с некоторым запасом... На самом деле, поскольку в вопросе оценивания неопределённости результата измерения всегда существуют некоторые неясности, то сомнения зачастую разрешались посредством преднамеренного завышения оценки. Второе представление заключалось в том, что источники, вносящие вклад в неопределённость, ... должны объединяться ... неким специальным способом».

Во-первых, *реалистические* и *безопасные* оценки в математической статистике называются соответственно *точечными* и *интервальными*.

Во-вторых, «всегда существующие некоторые неясности в вопросе оценивания неопределённости результата измерения» так и называются – неопределённости. Но согласно [5, п. D.6.1]: «Точное значение погрешности результата измерения, как правило, неизвестно и непознаваемо. Единственное, что можно сделать – это оценить значения входных величин, включая поправки на известные систематические эффекты, вместе с их стандартными неопределённостями (стандартными отклонениями) либо на основе неизвестных распределений вероятностей по полученным путём повторных наблюдений выборкам, либо на основе распределений, априорных или субъективно выбранных по имеющейся информации, после чего рассчитать результат измерения по оценкам входных величин и суммарную стандартную неопределённость этого результата по стандартным неопределённостям этих оценок. И только если есть твердая уверенность, что все вышеуказанные операции выполнены правильно и все значимые систематические эффекты учтены, можно предположить, что результат измерения является надёжной оценкой измеряемой величины и что его суммарная стандартная неопределённость является надёжной мерой её *возможной* погрешности». И это написано о «надёжной мере неизвестной и непознаваемой погрешности».

В-третьих, «некий специальный способ *объединения* составляющих погрешности» ещё в стандарте [32] назван «композицией», в стандарте [33] – обозначен символом «*», причём «объединение» есть «применение к составляющим погрешности измерений некоторого функционала, позволяющего рассчитать погрешность, обусловленную совместным воздействием этих составляющих».

Согласно [5, п. G.1.6], «на практике процедура свёртки при расчёте интервалов с заданными уровнями доверия не используется или используется крайне редко по следую-

щим причинам: параметры распределения входной величины обычно не известны точно, а являются лишь оценками; трудно ожидать, что уровень доверия для данного интервала может быть известен с высокой точностью; реализация этой процедуры сложна с математической точки зрения. Вместо этого применяют приближения, основанные на центральной предельной теореме». Однако оценки параметров со ссылкой на центральную предельную теорему все равно остаются «оценками» и «трудно ожидать, что уровень доверия...». И далее уже не про свёртку.

Но если неизвестны оба параметра распределения Гаусса, то для параметра рассеяния эффективной оценки не существует [31]. В этом смысле стандарт [32] по формулам для «результата измерения» и «СКО результата измерения» ничем не отличается от стандарта [5].

Этого нельзя сказать о свёртке и композиции. Различие между ними установил почти двести лет назад К. Якоби: композиция вырождается в свёртку только тогда, когда якобиан функционального преобразования распределений аргументов становится равным единице. Функциональное преобразование представлено в [5] как уравнение измерения в основной измерительной задаче GUM, которая решается методом косвенного измерения. И для того, чтобы превратить композицию в свёртку, это (в общем случае нелинейное) функциональное преобразование раскладывают в ряд Тейлора 1-го порядка, а получаемая при этом линейная функция аргументов называется формулой Тейлора. Тем не менее, в [5] свёртка равномерного распределения с распределениями Гаусса и равномерным рассматривается, и в последнем случае получается трапецевидное распределение, которое не используется в силу п. G.1.6.

В итоге оценки на основе центральной предельной теоремы могут только создать иллюзию высокой точности результата «измерения». И возникает ощущение, что GUM, в отличие от теории погрешностей, преследует совсем другие цели. Очевидные отличия заключены в цели измерительной задачи, используемом бюджете факторов, влияющих на результат решения, и форме его представления.

Рассмотрим, чем отличается бюджет неопределённости от бюджета погрешностей.

1. Стандартные неопределённости u_B , оценённые по типу B, – это те же априорные оценки границ погрешностей, которые являются ненаблюдаемыми при решении измерительной задачи, но уменьшенные в «корень из трёх» раз.

2. Стандартные неопределённости u_A , оценённые по типу A, – это те же СКО, но уменьшенные в «корень из N » раз.

3. Бюджет неопределённости оперирует двумя распределениями вероятностей – равномерными Гаусса, а в соответствии со стандартом [32] «когда оценка соответствия связана с оценкой неопределённости измерений, обычно применяют элементы теории статистической проверки гипотез». При этом «неопределённость измерений следует представлять в виде интервала неопределённости».

4. Бюджет погрешностей согласно [23, 25, 26, 34] оперирует усечёнными распределениями.

Принципиальное отличие заключается в цели измери-

тельной задачи. Бюджет погрешностей в схеме приведения позволяет получить наиболее правдоподобное распределение вероятностей для выходной переменной уравнения метода косвенного измерения [23, 26] и представить результат толерантным интервалом [27]. В гауссовом случае соответствующая составляющая бюджета погрешности должна быть найдена по [24].

Стандарт [5] нацелен на «среднее арифметическое» как на «наилучшую оценку измеряемой величины», сопровождаемую суммарной неопределённостью, умноженной на коэффициент охвата согласно заданной вероятности охвата. Такая оценка может быть использована в качестве показателя точности для оценки параметра положения распределения вероятностей возможных значений рассматриваемой выходной величины для случая, когда действительно имеет место распределение Гаусса. Практически такая оценка должна (!) приближаться к *доверительному интервалу* для параметра положения гипотетического распределения. Она пригодна для построения калибровочной кривой, но только в случае равнооточных измерений, так как границы погрешности большинства эталонов зависят от номинальных значений воспроизводимых величин.

Кроме всего прочего, в бюджете неопределённости должна (!) быть указана дефинициальная неопределённость используемого «уравнения измерения».

Неопределённость уравнения измерения. Первым в списке источников неопределённости измерений в GUM указано неполное определение измеряемой величины: «Поскольку математическая модель может быть неполной, для оценивания неопределённости на основе данных наблюдений следует обеспечить диапазоны вариативности влияющих величин, соответствующие тем, что имеют место в практических условиях измерений. Для получения достоверных оценок неопределённости рекомендуется, по возможности, использовать эмпирические математические модели, основанные на долговременных измерениях количественных величин, а также эталоны сравнения и контрольные карты, позволяющие судить, находится ли измерение под статистическим контролем. Если данные наблюдений, включая результаты статистически независимых измерений одной и той же измеряемой величины, свидетельствуют о неполноте модели, то модель должна быть пересмотрена. Использование хорошо спланированных экспериментов позволяет существенно повысить достоверность оценок неопределённости, поэтому планирование эксперимента следует рассматривать как важную часть в технике проведения измерений» [5, п. 3.4.2].

Бесспорно, «хорошо» спланированный эксперимент, может быть, и позволяет. Но бесспорно и то, что «первым шагом при проведении измерения является определение измеряемой величины, т.е. той величины, которую предстоит измерить. При этом измеряемая величина не может быть определена через некоторое значение, а только через свое описание. Однако, в принципе, *полное* описание измеряемой величины требует неограниченного количества информации. Неполнота описания измеряемой величины оставляет пространство для того или иного истолкования и, таким образом, вносит в неопределён-

ность результата измерения составляющую, которая может быть существенной по сравнению с требуемой точностью измерения» [5, п. D.1.1]. Но утверждение о том, что «... для получения результата измерения с меньшей неопределённостью необходимо будет определить измеряемую величину с большей полнотой» [5, п. D.3.4], практически опровергнуто примечанием: «несмотря на общую рекомендацию определять измеряемую величину с такой степенью полноты, чтобы обусловленная неполнотой описания неопределённость была пренебрежимо мала по сравнению с требуемой точностью измерения, следует понимать, что это не всегда реализуется на практике».

Этой составляющей неопределённости в [30, п. 5.44] дано название: «дефиниционная неопределённость: составляющая неопределённости измерений, являющаяся результатом ограниченной детализации в определении измеряемой величины».

Примечания.

1. Дефиниционная неопределённость есть практический минимум неопределённости измерений при *любом* измерении данной величины.

2. *Любое* изменение детализации в определении величины ведёт к другой дефиниционной неопределённости».

В [5, п. E.4.2] высказана ценная мысль о том, что все распределения вероятностей представляют собой выражение имеющихся на данный момент знаний. «В то время как точные значения составляющих погрешности результата измерения неизвестны и непознаваемы, *неопределённости*, связанные со случайными и систематическими эффектами, которые приводят к погрешности, могут быть оценены» [5, п. D.5.1].

Так, из-за отсутствия знания дефиниционной неопределённости «неопределённость *любого* измерения» оказалась неизвестной и непознаваемой величиной!

Литература

1. **Руководство** по выражению неопределённости измерения / Пер. с англ. Санкт-Петербург: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999.
2. **Тищенко В. А., Токатлы В. И., Лукьянов В. И.** О переводе и заимствовании терминологии из международных метрологических документов // Измерительная техника. 2003. № 10. С. 12–16.
3. **Тищенко В. А., Токатлы В. И., Лукьянов В. И.** Комментарии к метрологическим документам, регламентирующим обработку результатов измерений // Законодательная и прикладная метрология. 2006. № 4. С. 7–12.
4. **Чуйко В. Г.** О влиянии новых терминов на работу практикующего метролога // Измерительная техника. 2004. № 1. С. 20–23.
5. **ГОСТ Р 54500.3–2011.** Руководство ИСО/МЭК 98-3:2008. Неопределённость измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределённости измерения.
6. **Внедрение** стандартов ГОСТ Р ИСО 5725 в практику // Партнёры и конкуренты. 2002. № 9. С. 10–29.
7. **ГОСТ Р ИСО 5725–2002.** Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений.
8. **Кузнецов В. А., Ялунина Г. В.** Метрология: теоре-

тические, прикладные и законодательные основы. М.: Издательство стандартов, 1998.

9. **JCGM 100:201X (CD).** Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement.

10. **Левин С. Ф.** Новая терминология метрологии: решение проблем или новые проблемы? // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2016. № 11. С. 30–41.

11. **Левин С. Ф.** Метрология, математическая статистика, легенды и мифы XX-го века: Легенда о неопределённости // Партнёры и конкуренты. 2001. № 1. С. 13–25.

12. **Левин С. Ф.** Оптимальная интерполяционная фильтрация статистических характеристик случайных функций в детерминированной версии метода Монте-Карло и закон красного смещения. М.: Издательство АН СССР, 1980.

13. **Вопросы кибернетики.** ВК–94: Статистические методы в теории обеспечения эксплуатации. М.: Издательство АН СССР, 1982.

14. **Левин С. Ф.** Основы теории контроля. М.: Издательство МО СССР, 1983.

15. **Левин С. Ф., Блинов А. П.** Научно-методическое обеспечение гарантированности решения метрологических задач вероятностно-статистическими методами // Измерительная техника. 1988. № 12. С. 5–8.

16. **Левин С. Ф.** Схема приведения в методе косвенного измерения // Измерительная техника. 2004. № 3. С. 5–9.

17. **Линник Ю. В.** Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. 2-е изд. доп. и испр. М.: ФИЗМАТГИЗ, 1962.

18. **Левин С. Ф.** Метрологическое аттестование и сопровождение программ статистической обработки данных // Измерительная техника. 1991. № 12. С. 16–18.

19. **Колмогоров А. Н.** Реальный смысл результатов анализа // Труды II Всесоюзного совещания по математической статистике. Ташкент, 1949. С. 240–268.

20. **Гнеденко Б. В.** Курс теории вероятностей: Учебник. 6-е изд. М.: Наука, 1988.

21. **Левин С. Ф.** Техническое обеспечение эксплуатации изделий авиационной и ракетно-космической техники // Конструкции из композиционных материалов. 2001. Вып. 4. С. 48–66.

22. **Р 50.2.004–2000.** ГСИ. Определение характеристик математических моделей зависимостей между физическими величинами при решении измерительных задач. Основные положения.

23. **Р 50.1.037–2002.** Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Ч. II. Непараметрические критерии.

24. **ГОСТ Р 50779.21–2004.** Статистические методы. Правила определения и методы расчета статистических характеристик по выборочным данным. Ч. 1. Нормальное распределение.

25. **МИ 1317–2004.** ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.

26. **МИ 2916–2005.** ГСИ. Идентификация распределений вероятностей при решении измерительных задач.

27. **ГОСТ Р ИСО 16269-6-2005.** Статистические методы. Статистическое представление данных. Определение статистических толерантных интервалов.

28. **ГОСТ Р 8.820-2013.** ГСИ. Метрологическое обеспечение. Основные положения.

29. **ГОСТ Р 50779.10-2000.** Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения.

30. **РМГ 29-2013.** ГСИ. Метрология. Основные термины и определения.

31. **Вероятность и математическая статистика.** Энци-

клопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 1999.

32. **ГОСТ 8.207-76.** ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.

33. **ГОСТ 8.009-84.** ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

34. **МИ 188-86.** ГСИ. Средства измерений. Установление значений параметров методик поверки.

Дата принятия: 01.08.2017.

519.216.3

Использование временных рядов для формирования промежутков однотипного поведения параметров объекта при различных способах прогнозирования

Ю. С. СЫСОВЕВ

Волгодонский инженерно-технический институт –
филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»,
Волгодонск, Россия, e-mail: sysoev2004@mail.ru

Рассмотрены новые подходы к формированию промежутков однотипного поведения параметров объекта по временным рядам. Промежутки сформированы в виде некоторых наборов последовательных значений параметров (координат векторов-соседей), близких к набору последних значений, которые используются при прогнозировании. Показано, что построенная методика позволяет увеличить число векторов-соседей для нахождения статистических характеристик. Предложен единый алгоритм для получения множества векторов-соседей в каждом из рассматриваемых вариантов. Построен алгоритм прогнозирования на один шаг, основанный на анализе координат векторов-соседей.

Ключевые слова: временные ряды, методы прогнозирования, дрейф параметров, векторы-соседи.

The new approaches to formation of intervals of the same object parameter behavior on time-series in the form of parameter consecutive value sets (coordinates of the «neighbor vectors») close to a set of their last values used when forecasting. It's shown that the constructed technique allows to increase number of neighbor vectors to find statistical characteristics used at forecasting. The uniform algorithm for receiving a set of neighbor vectors in each of the considered options is offered. The algorithm of forecasting for one step based on the analysis of coordinates of the neighbor vectors in a special way constructed is developed.

Key words: time-series, forecasting methods, parameter drift, neighbor vectors.

Одной из важных задач, с которыми приходится сталкиваться специалистам различных областей знаний, является прогнозирование событий. Решение задачи прогнозирования дрейфа параметров позволяет делать выводы о предполагаемом поведении контролируемого объекта. Такая задача – частный случай задачи прогнозирования событий. Чаще всего параметр непрерывен, поэтому прогнозирование предполагает экстраполяцию непрерывной функции. Однако на практике, как правило, невозможно определить вид функции, экстраполяцию которой необходимо проводить (эта функция может не представляться аналитически), поэтому приходит-

ся задачу прогнозирования решать дискретными методами.

Для применения дискретных методов выполняют мониторинг значений указанного параметра, затем по последним его значениям, используя методики [1–7], прогнозируют последующие значения этого параметра. При мониторинге получается некоторый временной ряд. Задача состоит в том, чтобы по последним k значениям ряда определить (приблизённо), какими будут его последующие значения. Фактически – это задача экстраполяции временного ряда за пределы известных значений.

Однако существует другой подход к прогнозированию. Он основан на учёте ситуаций, возникающих при наблюдениях