



## МОДЕЛИ ВЫБОРА ТИПА ПЕРВИЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ЕГО НЕЛИНЕЙНОЙ ОШИБКИ

Ю.Е. Шишкин, А.В. Скатков

Институт природно-технических систем, РФ, г. Севастополь, ул. Ленина, 28

\*E-mail: [iurii.e.shishkin@gmail.com](mailto:iurii.e.shishkin@gmail.com)

В работе рассматривается применение имитационного моделирования и математических методов для поддержки принятия решений по выбору типа первичного измерителя с учетом характеристик его нелинейной ошибки. Подход объединяет алгоритмическое решение на основе имитационного моделирования и математическую модель целочисленных булевских многокритериальных оптимизационных задач. Решение направлено на формализацию процедур формирования оптимальных моделей переключения типов и шкал измерений, минимизирующих ошибку измерений как нелинейной функции по шкале, при высокой и низкой интенсивностях случайной помехи и обеспечивающих минимальные потери точности.

**Ключевые слова:** выбор шкалы измерений, имитационное моделирование, алгоритмическое решение, математическая модель оптимизации, многокритериальная оптимизационная задача.

Поступила в редакцию: 27.10.2023. После доработки: 08.12.2023.

**Введение.** Специфика современных измерений в системах контроля природной среды требует тщательного подхода к выбору типа первичного измерителя для достижения необходимой точности [1–3]. Однако определение оптимальной шкалы остается актуальной научной и прикладной задачей в различных областях, включая технику, инженерию, медицину, природно-технические системы и вызывает значительные трудности у исследователей и специалистов [4–6]. Ошибка при измерении является нелинейной функцией относительно выбранной шкалы и существенно зависит от типа первичного измерителя и верхнего предела этой шкалы. Даже при использовании цифровых измерительных приборов, где внутренние компоненты могут быть цифровыми, часто применяются аналоговые первичные измерители, для которых проблема остается актуальной [7, 8].

Для решения этой задачи предлагается двойственный методологический подход, включающий алгоритмические решения на основе имитационного моделирования и математическую модель на основе методов решения целочисленных булевских многокритериальных оптими-

зационных задач. Комбинированный подход представляет собой интеграцию имитационного моделирования и аналитических методов в единую модель оптимального переключателя шкал измерений, и в отличие от первых двух позволяет использовать априорные данные, полученные из имитационной модели, для поддержки аналитического подхода [9–12]. Имитационное моделирование позволяет создать виртуальную среду, которая имитирует реальные условия и процессы, связанные как с процедурами измерений, так и непосредственно с переключателем датчиков, обладающих специфическими нелинейными погрешностями на шкале измерений [13, 14]. Собранные данные из имитационной модели служат базой для аналитического подхода и включают в себя информацию о времени переключения, энергетическом потреблении, точности измерений и других метриках, важных для задачи оптимизации. Проведенные эксперименты, путем варьирования параметров и условий эксперимента, позволяют получить статистические данные об эффективности различных сценариев и построить Парето множество оптимальных вариантов переключателей.

**Аналитические методы преодоления нелинейностей.** Средства измерений играя ключевую роль во многих областях мониторинга природных систем, требуют точности и надежности датчиков при переменных условиях. Этой проблемой занимались Никитин В.А. и Бойко С.В. которые в своей работе рассматривали базовые виды нелинейностей, такие как «сухого трения», «зоны нечувствительности», «насыщение», «зазор», «трехпозиционное реле», «аналого-цифровой преобразователь», являющиеся фундаментальными, с которыми приходится сталкиваться при использовании средств измерений [15–17].

Акцентируя внимание на разнообразных характеристиках существенно нелинейных элементов, необходимо тщательно проанализировать математические модели средств измерений, которые охватывают данные нелинейности. Выходная величина измерительного прибора в общем виде строится в соответствии с соотношением

$$y_i = f(x_i; y_{max}) + \varepsilon(x_i; y_{max}) + e(x_i; y_{max}), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  случайная помеха в зависимости от измеряемой величины  $x_i$ ,  $x_i$  – измеряемая величина,  $e$  – нелинейная ошибка,  $y_{max}$  – верхний номинал шкалы.

Источники нелинейности, определяемые характером  $f$ , могут принимать различные формы. Эти источники нелинейности невозможно преодолеть в реальных измерениях, поэтому разрабатываются модели для коррекции этих нелинейностей с применением математических методов. Основной вклад в ошибки измерения вносят нелинейности средств измерения, обладающие существенной зоной нечувствительности, склонные к насыщению, с гистерезисом и ступенчатостью при проведении аналого-цифрового преобразования.

**Анализ методов линеаризации и их ограниченность.** В прошлом была предложена попытка решения указанной задачи, проведенная Безугловым Д.А. и Юхновым В.И., в рамках которой был

предложен подход к проблеме оптимального переключателя шкал измерений [18–20].

Для решения задачи линеаризации нелинейных приборов измерений необходимо применять обратные нелинейные преобразования. Идея заключается в том, чтобы использовать искаженные нелинейностями входные данные, а затем компенсировать эти нелинейности с помощью математических методов. В этом контексте авторы рассматривают подход, основанный на уравнениях Фоккера–Планка–Колмогорова, статистической линеаризации, квазилинейным методом и методом функциональных рядов.

При том, что эти методы хорошо себя зарекомендовали при использовании в условиях наличия большого объема априорной информации, их применение практически не представляется возможным в реальном времени. В частности, применение этих методов ограничивается их сложностью и необходимостью наличия априорной информации о параметрах нелинейных стохастических уравнений. Также стоит выделить, что выполнение работ по идентификации параметров таких уравнений представляет собой значительную сложность, поскольку это требует регулярных корректировок в процессе измерений. Дополнительным ограничением является предположение о воздействии на измерения лишь помехи типа гауссовского белого шума, что, на практике, редко выполняется, поскольку математическое ожидание ошибки часто не является нулевым трендом.

В связи с выявленными ограничениями существующих методов возникает потребность в новом подходе к решению проблемы, связанной с нелинейностями при построении оптимального переключателя шкал измерений. Необходимость такого подхода обусловлена желанием минимизировать ошибки, связанные с нелинейностями, и улучшить точность измерений в реальном времени. В результате анализа существующих методов линеаризации и их ограничений стано-

вится ясно, что создание нового подхода является важным шагом в области детерминированной дискретной оптимизации измерений.

**Предлагаемый подход к минимизации влияния нелинейностей.** Ошибка  $e$  зависит от измеряемой величины  $u$  и выбранного переключателя шкал измерений  $u_j$ . Следовательно, ошибка может быть представлена как функция  $e(u, u_j)$ .

*Функция распределения ошибки.* Ошибка  $e$  имеет аргументы, связанные с измеряемой величиной. Для полного описания ошибки необходимо знать функцию распределения и ее параметры, такие как математическое ожидание  $M$  и стандартное отклонение  $\sigma$ . Эти параметры определяют характер распределения ошибки

$$P(e) = P(e; M, \sigma),$$

где  $P(e)$  представляет собой функцию плотности распределения ошибки  $e$  с параметрами  $M$  и  $\sigma$ .

Для решения задачи оптимального переключателя шкал измерений, которая заключается в выборе такого единственного значения  $j$ , которое минимизирует ошибку  $e$  соответствующей шкалы, использовались следующие методы:

*Математическая оптимизация:* используя методы математической оптимизации, необходимо найти значение  $j$ , при котором ошибка  $e(u, u_j)$  минимальна. Для этого используются различные подходы оптимизации, включая алгоритмическое решение на основе имитационного моделирования и математической модели на основе методов решения целочисленных булевских многокритериальных оптимизационных задач.

Анализ формирования ошибки в зависимости от выбранной шкалы измерений и измеряемой величины является одним из ключевых аспектов исследования. Для каждой комбинации измеряемой величины  $u$  и шкалы  $u_j$  существуют различные способы формирования ошибки  $e(u, u_j)$ . Это связано с особенностями методов измерений, систематиче-

скими эффектами, стоимостями переключения шкал, ценой ошибок измерений и другими факторами, которые влияют на качество измерения.

*Модельный пример.* Рассмотрим обобщенную ситуацию, когда необходимо измерить напряжение величиной до 1 В. При этом, выбор шкалы измерения представляет собой нетривиальную задачу так как возможные варианты включают шкалы от 0 до 1 В, от 0 до 5 В или от 0 до 10 В. Кроме того, для каждого из диапазонов возможны различные виды нелинейности, которые будут рассмотрены в работе. Даже при использовании цифрового измерительного прибора, у которого внутренний преобразователь может быть цифровым, первичное измерение как правило осуществляется аналоговым датчиком, тем самым, проблема выбора оптимальной шкалы остается актуальной и применимой в том числе к цифровым устройствам.

Например, аналоговый термодатчик представляет собой одно из технических решений, где проблема соотношения шкалы измерения с требуемой точностью становится наглядной. При измерении температуры, аналоговый термодатчик обычно подключается в мостовую схему, где физическая величина температуры преобразуется в соответствующую электрическую величину, такую как напряжение или сила тока. При этом выбор пределов шкалы измерения напрямую влияет на точность измерений и возможность выявления линейной зависимости между измеряемой физической величиной и ее электрическим представлением. Как правило, линейность соблюдается в достаточно ограниченном диапазоне, вследствие чего требуется обязательное соблюдение рабочего диапазона измерительного канала по ожидаемому диапазону измеряемых величин.

**Классификация информационных ситуаций в зависимости от типа первичного измерителя и формы изменения нелинейной ошибки.** Проведем классификацию информационных ситу-

аций, связанных с процессом измерений, на основании формы изменения ошибки в зависимости от измеряемой величины, которая приводит к кластеризации множества возможных ситуаций на следующие три: монотонное возрастание ошибки, монотонное убывание ошибки и унимодальный характер случайной ошибки.

В общем случае можно построить модель ошибки  $e$  в виде степенной функции заданной на диапазоне 0..1 имеющей вид

$$e(x) = ax^n + bx + c, \quad (2)$$

где  $a, b, c, n$  – эмпирически подбираемые коэффициенты функции зависимости ошибки от измеряемой величины.

Это явление наблюдается, например, в механических средствах измерений, основанных на применении закона Гука, который описывает линейную зависимость между величиной действующей силы и линейными деформациями пружины в узком диапазоне

$$F_{el} = k(n, y) \cdot \Delta l,$$

где  $k$  коэффициент пропорциональности, зависящий от шума  $n$  и измеряемой величины  $y$  при малых изменениях  $\Delta l$ .

Однако, за пределами этого диапазона, когда действующая сила становится слишком велика или пружина подвергается усталостным деформациям, наблюдается отклонение от линейной зависимости и возрастание нелинейной ошибки измерения.

Эти факты учтены в [21] и подразумевают, что различные характеристики нелинейности могут потребовать различных подходов к выбору типа первичного измерителя. Однако, при наличии априорной информации о том, что нелинейность монотонно убывает, возрастает или является унимодальной, эта дополнительная информация позволяет уточнить получаемое решение. Учет дополнительной информации о характере нелинейности позволяет обеспечить более

точное и адаптированное решение в зависимости от конкретных обстоятельств.

*Случай с монотонным по шкале возрастанием нелинейной ошибки.* Ошибка измерения монотонно возрастает с ростом измеряемой величины. Наличие такой зависимости означает, что при увеличении измеряемой величины нелинейная ошибка также увеличивается, что может значительно влиять на точность измерений и последующие результаты. Например,  $f(x)$  можно представить в виде (2), где  $a = -4, b = 8, c = 1, n = 2$ .

*Случай с монотонно убывающей нелинейной ошибкой.* В этом случае ошибка измерения убывает с ростом измеряемой величины и может быть связана с формированием существенной зоны нечувствительности в измерительной системе. Например, влияние сил трения может привести к образованию такой зоны, где ошибки измерения больших величин оказываются незначительными. Однако, при приближении к начальным границам этой зоны возникают систематические отклонения и увеличение ошибки измерения. Можно математически  $g(x)$  представить в виде (2), где  $a = 4, b = -8, c = 5, n = 2$ .

*Случай унимодального характера проявления нелинейной ошибки.* В данном случае ошибка имеет унимодальную форму и достигает максимального значения в середине диапазона измерений. Такое поведение наблюдается, например, в радиотехнических измерениях, где возникают резонансные явления. Вблизи точки резонанса ошибка измерения может быть значительной, в то время как на краях диапазона ошибка снижается. Математически  $h(x)$  может быть представлено в виде (2), где  $a = 16, b = -16, c = 5, n = 2$ .

Из классификации информационных ситуаций по форме изменения ошибки можно выяснить, с каким типом ошибки имеем дело в конкретной измерительной системе. Это важно для выбора оптимального переключателя типов и выбора шкал измерений, которые обеспечат наилучшую точность и эффективность в

каждой конкретной информационной ситуации.

**Классификация целевых критериев качества при выборе номинала шкалы для лиц, принимающих решения.** Ошибки измерений, возникающие в процессе сбора данных, могут быть учтены в целевой функции различными способами и, в зависимости от конкретной целевой задачи, выражаются в одном из следующих видов:

– Максимальная ошибка на пакете – определение максимального значения ошибки, возникшей на пакете измерений. Если в пакете присутствует хотя бы одно измерение с большой ошибкой, это может существенно влиять на точность и надежность результата. Таким образом, выбор пакета, для которого максимальная ошибка минимальна, может быть одним из критериев оптимальности.

– Средняя ошибка на пакете – этот критерий позволяет учесть общую точность пакета шкал в совокупности, несмотря на возможное наличие отдельных измерений с высокой ошибкой.

– Минимальная ошибка на пакете – если в пакете имеется хотя бы одно измерение существенно улучшенной точностью, это может быть критерием выбора. Пакеты со значительным количеством измерений, имеющих низкую ошибку, могут обеспечить более точные результаты в целом.

– Стандартное отклонение (СКО): является мерой разброса значений ошибок измерения на пакете. Меньшее СКО означает, что ошибки более устойчивы и меньше подвержены случайным возмущениям. Пакеты, для которых СКО ошибок минимально, могут быть предпочтительными с точки зрения повышения надежности и стабильности процесса измерений.

Второй важный набор критериев при выборе оптимального пакета измерений – это стоимостные критерии. Эти критерии отражают выгоду и затраты, связанные с использованием конкретного пакета. Типичные для природно-технических систем критерии включают следующие:

Максимальная стоимость измерений на пакете. Выбор пакета с наименьшими затратами может быть предпочтительным с точки зрения ограничения бюджета и ресурсов.

Минимальная стоимость измерений. В отличие от предыдущего критерия, минимальная стоимость измерений учитывает затраты на все измерения в пакете. Эта мера может быть полезна при стремлении к оптимизации общих затрат на измерения.

Средняя стоимость измерений на пакете также играет важную роль при выборе оптимального пакета шкал. Распределение стоимости по всем измерениям позволяет более объективно оценить среднюю нагрузку на ресурсы и бюджет.

**Процедуры имитационного моделирования в задаче выбора типа первичного измерителя.** В модели пользователем задаются параметры генерации измеряемых величин с учетом  $\varepsilon$  – случайной помехи и  $e$  – нелинейной ошибки, определенных в (1). Пользователю доступны управляемые параметры внутри модели: изменение объема выборок случайных величин, закон их распределения, характер нелинейности случайной ошибки, настройки репликации.

Предположим, что у нас есть  $M$  измеряемых величин и  $N$  возможных шкал, на которых эти величины могут быть измерены. В данном контексте, каждая измеряемая величина может быть рассмотрена как случайная величина с некоторым распределением. В зависимости от наличия априорной информации возможны два случая:

Первый случай предполагает, что функции распределения всех измеряемых величин и их числовые характеристики, такие как математическое ожидание и стандартное отклонение, известны заранее. Это означает, что у нас есть точная информация о каждой величине и ее распределении на конечном промежутке. В таком случае эта информация используется для выбора оптимальной шкалы измерений для каждой величины.

Второй случай предполагает, что функции распределения измеряемых величин априорно неизвестны. Однако мы будем считать, что эти функции принадлежат некоторому заранее определенному списку распределений. В таком случае продуктивным будет выбор функции распределения случайным образом из этого списка. Существует два подхода к выбору случайного распределения: равномерный и с использованием вектора предпочтений.

В случае равномерного подхода мы выбираем функцию распределения из списка с равной вероятностью для каждого распределения. Например, если список содержит нормальное и равномерное распределения, мы можем выбирать каждое из них с вероятностью 0.5.

В случае использования вектора предпочтений пользователь присваивает каждому распределению в списке определенные вероятности выбора. Например, можно выбирать нормальное распределение с вероятностью 0.3 и равномерное распределение с вероятностью 0.7. Такой вектор предпочтений позволяет описать предпочтения в выборе функции распределения и обеспечивает более гибкий подход к имитационному моделированию.

**Пример реализации процедуры имитационного моделирования.** На первом этапе осуществляется выполнение измерения на каждой шкале и формирование матрицы  $E$  с элементами  $i, j$ , где  $i$  соответствует номеру измеряемой величины, а  $j$  – номеру шкалы. После этого производится свертка матрицы  $E$  по индексам  $i, j$ , где среднее значение по столбцам представляет среднюю ошибку для каждой шкалы, а среднее значение по строке обозначает среднюю ошибку для каждой измеряемой величины. Для минимизации минимальной ошибки выбирается минимальный элемент в результирующей строке матрицы  $E$ , индекс которого и соответствует номеру наилучшей шкалы.

Рассмотрим альтернативную стратегию, когда осуществляется поиск мак-

симальной ошибки по каждой измеряемой величине. В этом случае результирующим становится столбец матрицы  $E$ , где выбор минимума в этом столбце позволяет определить минимальную ошибку для каждой измеряемой величины. При выполнении данной процедуры могут быть учтены ограничения, для этого устанавливается верхнее значение для максимальной ошибки, которое не должно быть превышено. При выборе оптимальной шкалы осуществляется контроль, чтобы максимальная ошибка не превышала заданного значения.

Более сложным, по сравнению с рассмотренными выше, является вариант, минимизирующий максимальную ошибку – минимаксный критерий.

**Обобщение задачи для пакетов измерений.** В классической постановке используется канал, измеряющий единственную величину среды в разных точках, для которого составляется оптимальная стратегия выбора шкалы. Однако, если измеряется пакет величин, то встает вопрос об обобщении этого подхода на выбор шкалы для пакета источников.

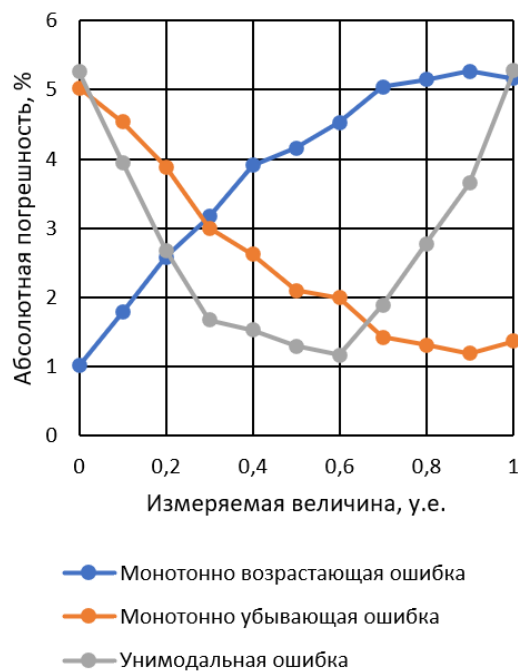
Для имитационной модели мы можем представить каждую репликацию в виде канала, измеряющего пакет величин, где каждый источник измерения соответствует отдельной шкале. Для получения статистически устойчивых результатов проводится  $L$  репликаций имитационной модели, в каждой из которых будет выбираться определенная шкала измерения. На каждой репликации отмечается, какая шкала была выбрана как наилучшая, и подсчитывается число выборов для каждой из шкал. После проведения всех репликаций, осуществляется выбор шкалы с наибольшей частотой использования. Эту процедуру можно рассматривать как решение детерминированной задачи дискретной оптимизации, где оптимальным решением является шкала с наибольшей частотой выбора.

*Парето подход в пространстве компромиссных решений.* При решении зада-

чи оптимального переключателя шкал измерений, встречаются ситуации, когда необходимо найти компромиссные решения, которые учитывают различные критерии, такие как ошибка и стоимость. В таких случаях продуктивным является использование Парето подхода, который позволяет найти множество оптимальных решений, называемое также Парето-множеством. Ось ошибки и ось стоимости представляют собой систему координат, каждая точка на этой системе координат представляет использование определенной шкалы измерения.

При анализе точек на данной системе координат формируется поле ошибок, которое представляет собой множество точек, соответствующих различным комбинациям ошибки и стоимости. Затем, для полученного поля ошибок необходимо сформировать Парето-множество, которое содержит только те точки, в которых нельзя одновременно улучшить оба критерия. Для формализации процесса формирования Парето-множества используются специальные методы, которые позволяют удалить из исходного поля ошибок лишние точки, оставив только наиболее значимые. После формирования Парето-множества, лицо принимающее решение выбирает одну точку из множества с помощью эвристического подхода. Этот выбор может осуществляться на основе предпочтений и приоритетов ЛПР.

**Экспериментальные исследования.** Эксперимент проводился в среде Google Spreadsheet v1.2 на основе заданного пакета величин, в который входят четыре измеряемые случайные величины ( $M = 4$ ) с диапазонами значений 0.05–0.1, 0.35–0.45, 0.45–0.65 и 0.85–0.95 соответственно. Значения этих величин были равновероятно распределены в указанных интервалах, а их математическое ожидание находилось в середине каждого интервала, результаты моделирования приведены на рис. 1. В модели учитывалось наличие трех различных шкал измерений ( $N = 3$ ) и особенности их погрешности.



**Рис. 1.** Результаты моделирования ошибок измерений в каналах с низкой интенсивностью случайной помехи  
**Fig. 1.** Results of modeling measurement errors in channels with low random noise intensity

Для синтеза системы поддержки принятия решения по выбору типа первичного измерителя на основе имитационного моделирования с учетом нелинейной ошибки, был проведен ряд экспериментов, направленных на анализ характеристик различных типов датчиков в условиях их использования в реальных ситуациях. Для каждого диапазона измеряемых значений и каждого типа датчика, характеризующегося определенной нелинейностью ошибки, были получены погрешности и проведено их относительное ранжирование. Результаты этих имитационных моделирований представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Матрица принятия решений по выбору типа датчика в зависимости от ожидаемого диапазона измеряемой величины

Тип датчика	Диапазон измеряемых значений		
	0 – 0,2	0,2 – 0,7	0,7 – 1
МВО	Н	С	В
МУО	В	С	Н
УМО	В	Н	В

На основе представленной матрицы принятия решений, где МВО обозначает монотонно возрастающую ошибку, МУО – монотонно убывающую ошибку, УМО – унимодальную ошибку, а погрешности обозначены как высокая (в), средняя (с) и низкая (н), ЛПП разрабатывает стратегию выбора типа первичного измерителя для минимизации погрешности на каждом диапазоне измерения.

Для решения этой задачи можно воспользоваться алгоритмом, который принимает во внимание характеристики измеряемых значений, диапазон шкалы, тип и характер ошибки для каждого диапазона измерения. Ниже представлены рекомендации по выбору типа датчика для минимизации погрешности на каждом диапазоне:

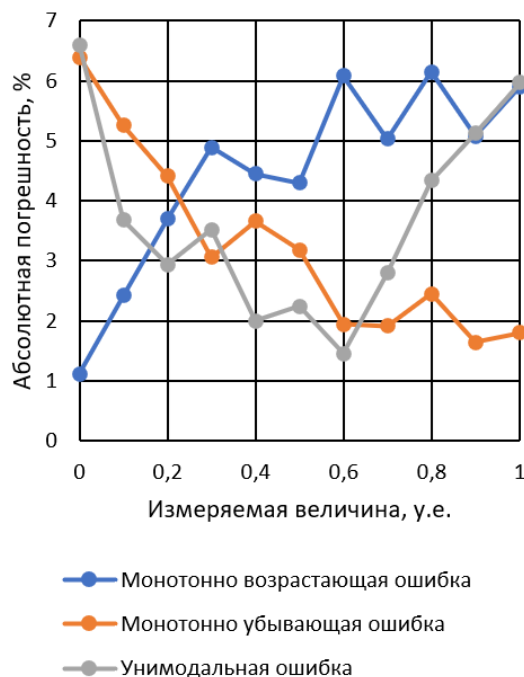
*Диапазон 0 – 0,2:* Для этого диапазона целесообразно выбрать тип датчика с монотонно возрастающей ошибкой (МВО) с низкой погрешностью — это обеспечит точные измерения в этом диапазоне.

*Диапазон 0,2 – 0,7:* Здесь наилучшим выбором может быть тип датчика с унимодальной ошибкой (УМО) с низкой погрешностью (н), поскольку унимодальная ошибка обычно имеет лучшую предсказуемость в значениях близких к середине интервала.

*Диапазон 0,7 – 1:* В этом диапазоне более подходящим выбором может стать тип датчика с монотонно убывающей ошибкой (МУО), поскольку для этого диапазона этот тип датчика обычно обеспечивает более точные измерения.

В представленном контексте, случайная ошибка проявляет относительно невысокую степень интенсивности, что приводит к получению малошумных измерений, в связи с чем принятие решений на их основе о выборе шкалы относительно простое.

На рис. 2 представлены результаты моделирования, демонстрирующие влияние сильных шумов на измерения, что вызвано значительным увеличением случайной ошибки. В этом сценарии принятие решений становится значительно более сложным. Решение требует определенных усилий по снижению влияния случайной ошибки, например, путем увеличения объема проводимых измерений.



**Рис. 2.** Результаты моделирования ошибок измерений в каналах с высокой интенсивностью случайной помехи

**Fig. 2.** Results of modeling measurement errors in channels with high random noise intensity

В результатах экспериментов, проведенных с использованием начальных условий с повышенной интенсивностью случайных ошибок, было подтверждено, что использование матрицы принятия решений в случае зашумленности становится значительно затруднительным. В таких условиях использование простых сравнений становится недостаточно эффективным, поскольку не учитываются сложные взаимосвязи между нелинейной ошибкой и выбором типа измерителя. Вместо этого целесообразным методом представляется использование функций штрафа, что позволяет более точно учитывать влияние нелинейной ошибки и принимать более обоснованные решения.

Данные шкалы моделировали три типовые устройства для измерения пакета величин: механический измеритель, электромеханический и электронный. Каждое устройство работало с определенными шкалами измерений, имеющими указанные выше особенности нелинейности погрешности. Была проведена



серия экспериментов, в которых измерения пакетов величин осуществлялись с использованием различных комбинаций шкал измерений и устройств. Для каждой комбинации фиксировались измеренные значения измеряемых величин и рассчитывалась общая погрешность каждого измерения. Эти данные позволили сравнить эффективность различных комбинаций шкал и устройств в контексте минимизации погрешностей.

**Заключение.** Представлен подход к выбору типа первичного измерителя в системах контроля природной среды, основанный на имитационном моделировании как средстве поддержки принятия решений, направленный на создание формальных процедур формирования оптимальных моделей выбора первичного измерителя с учетом характеристик его нелинейной ошибки, минимизирующих потери точности и учитывающих ограничения по суммарным расходам на изменение шкал. Исследование формирования ошибок в зависимости от выбранного типа первичного измерителя и измеряемой величины позволило выявить типичные информационные ситуации, такие как монотонное возрастание ошибки, монотонное убывание ошибки и унимодальный характер случайной ошибки, и рассмотреть их в контексте выбора оптимального типа первичного измерителя.

Построены математические модели оптимального выбора типа первичного измерителя на основе методов математической оптимизации, включая алгоритмическое решение на основе имитационного моделирования и математическую модель на основе методов решения целочисленных булевских многокритериальных оптимизационных задач. Эти модели позволяют найти оптимальное решение, минимизирующее ошибку при выборе типа первичного измерителя.

Предложен комбинированный подход, который представляет собой интеграцию имитационного моделирования и аналитических методов в единую модель оптимального переключателя типов первичных измерителей, позволяющий использовать априорные данные, получен-

ные из имитационной модели, для поддержки аналитического подхода. Это расширяет возможности оптимального выбора типа первичного измерителя, учитывая более точные данные и априорные знания.

Результаты экспериментальных исследований, в которых с использованием различных типов первичных измерителей проводились измерения пакетов величин, позволили сравнить эффективность различных комбинаций типов первичных измерителей в контексте минимизации погрешностей.

Таким образом, предложенные методы и модели представляют собой инструмент для оптимального выбора типа первичного измерителя, обеспечивающие минимальные ошибки и учитывающие ограничения по суммарной величине расходов на переключения. Эти результаты могут быть применимы в различных областях, включая технику и инженерию, медицину и природно-технические системы, где важна точность и надежность измерений.

*Работа выполнена по госбюджетной теме ИПТС "Разработка новых средств и измерительных информационных технологий исследований природных вод" (№ госрегистрации 121122300070-9).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сизов И.И., Марколия А.И., Кенигсбергер Г.В. Опыт гидроакустического мониторинга у кавказского побережья Черного моря // Метрология гидроакустических измерений. Материалы Всероссийской научно-технической конференции. 2013. С. 218–228.
2. Дулов В.А., Юровская М.В., Козлов И.Е. Прибрежная зона Севастополя на спутниковых снимках высокого разрешения // Морской гидрофизический журнал. 2015. № 6 (186). С. 43–60.
3. Шишкин Ю.Е. Обнаружение неоднородностей и аномалий данных мониторинга морской среды методами вейвлет-анализа // Системы контроля окружающей среды – 2021. Тезисы до-

кладов Международной научно-практической конференции. Севастополь, 2021. С. 48.

4. *Кенигсбергер Г.В., Малышев К.И., Марколия А.И.* К концепции акустического мониторинга Черного моря // Труды научно-практической конференции "Современные технологии создания средств наблюдения". Дубна, 2006, С. 62–69.

5. *Мобильный робототехнический комплекс для мониторинга прибрежной зоны / А.М. Беляев, В.В. Беляков, П.О. Береснев и др.* // Экологические системы и приборы. 2016. № 8. С. 3–10.

6. *Шишкин Ю.Е., Скатков А.В.* Интеллектуальная система адаптивного выбора сценариев параметрического обнаружения дивергенций данных мониторинга // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 2 (36). С. 37–42. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-2-37-42

7. *Безуглов Д.А., Юхнов В.И.* Нелинейные преобразования метрологических характеристик автономных средств измерений // Научный альманах. 2015. № 10-3 (12). С. 36–38.

8. *Скатков А.В., Брюховецкий А.А., Моисеев Д.В.* Дискриминантный подход к обнаружению аномалий с использованием марковских последовательностей // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 4 (38). С. 43-49. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-4-43-49

9. *Кревченко Ю.Р.* Основы проектирования приборов и систем. Новочеркасск, 2006. 72 с.

10. *Тхишев А.Н., Горшков П.С., Головкин А.П.* Информационная безопасность в мобильных модульных измерительных комплексах // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2017. Т. 20. № 6. С. 99–110.

11. *Грубо Е.О., Королев П.Г.* Методика расчета метрологического ресурса измерительного канала для средств измерений с автоматической коррекцией // Сборник докладов 63-й Научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава университета. СПб., 2010. С. 228–233.

12. *Скатков А.В., Брюховецкий А.А., Моисеев Д.В.* Мера Кульбака в задачах

динамической кластеризации наблюдений состояния окружающей среды // Системы контроля окружающей среды. 2019. № 3 (37). С. 35–38. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-3-35-38

13. *Ефремов Л.В.* Запас метрологической надежности как критерий оценки исправности средств измерений // Известия вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53. № 7. С. 51–53.

14. *Северцев Н.А., Бецов А.В., Дарьина А.Н.* Методы и модели создания автоматизированных средств контроля для повышения безопасности функционирования технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 2 (26). С. 19–26.

15. *Никитин В.А., Бойко С.В.* Методы и средства измерений, испытаний и контроля. Учебное пособие 2-е изд. перераб. и доп. Оренбург ГОУ ОГУ, 2004. 462 с.

16. *Данилов А.А., Спутнова Д.В.* Анализ моделей описания нестабильности средств измерений // 175 лет ВНИИМ им. Д.И. Менделеева и Национальной системе обеспечения единства измерений: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. (г. Санкт-Петербург, 14–15 июля 2017 г.). СПб., 2017. С. 49.

17. *Акимов В.А., Быков А.А., Щетинин Е.Ю.* Введение в статистику экстремальных значений и ее приложения. Москва, 2009. 536 с.

18. *Безуглов Д.А., Юхнов В.И.* Нелинейные преобразования метрологических характеристик автономных средств измерений // Фундаментальные исследования. 2015. № 11-2. С. 232–236.

19. *Безуглов Д.А., Поморцев П.М.* Автономные средства измерений: монография; Ростовская акад. сервиса (фил.), Южно-российский гос. ун-т экономики и сервиса. Ростов-на-Дону, 2007. 168 с.

20. *Юхнов В.И.* Применение теории марковских процессов в метрологии // Вестник научных конференций. 2017. № 1-4 (17). С. 120–122.

21. *ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008.* Неопределенность измерения. Руководство по выражению неопределенности измерения. Введ. 2017-07-14. М.: Стандарт информ, 2008. 112 с.

SELECTING PRIMARY SENSOR TYPES CONSIDERING  
NONLINEAR ERROR CHARACTERISTICS

Y.E. Shishkin, A.V. Skatkov

Institute of Natural and Technical Systems, RF, Sevastopol, Lenin St., 28

The research explores the application of simulation modeling and mathematical methods to support decision-making in selecting the primary measuring instrument type while considering the characteristics of its nonlinear error. The approach combines algorithmic solutions based on simulation modeling and a mathematical model for integer Boolean multicriteria optimization problems. The solution aims to formalize the procedures for creating optimal switching models and measurement scales, minimizing measurement error as a nonlinear function across the scale, under high and low intensities of random interference, while ensuring minimal loss of accuracy.

**Keywords:** measurement scale selection, simulation modeling, algorithmic solution, mathematical optimization model, multi-criteria optimization problem.

REFERENCES

1. *Sizov I.I., Markoliya A.I., and Kenigsberger G.V.* Opyt gidroakusticheskogo monitoringu u kavkazskogo poberezh'ya Chernogo morya (Experience in hydroacoustic monitoring off the coast of the Black Sea) // *Metrologiya gidroakusticheskikh izmereniy. Materialy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, 2013, pp. 218–228.
2. *Dulov V.A., Yurovskaya M.V., and Kozlov I.E.* Pribrezhnaya zona Sevastopolya na sputnikovykh snimkakh vysokogo razresheniya (The coastal zone of Sevastopol in high-resolution satellite images) // *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, 2015, No. 6 (186), pp. 43–60.
3. *Shishkin Yu.E.* Obnaruzheniye neodnorodnostey i anomalii dannykh monitoringu morskoy sredy metodami veyvlet-analiza (Detection of heterogeneities and anomalies in marine environment monitoring data using wavelet analysis) // *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy – 2021. Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Sevastopol*, 2021, P. 48.
4. *Kenigsberger G.V., Malysh'ev K.I., and Markoliya A.I.* K koncepcii akusticheskogo monitoringu Chernogo morya (On the concept of acoustic monitoring of the Black Sea) // *Trudy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennyye tekhnologii sozdaniya sredstv nablyudeniya"*. Dubna, 2006, pp. 62–69.
5. *Belyaev A.M., Belyakov V.V., and Beresnev P.O.* Mobil'nyy robototekhnicheskii kompleks dlya monitoringu pribrezhnoy zony (Mobile robotic complex for monitoring the coastal zone) // *Ekologicheskkiye sistemy i pribory*, 2016, No. 8, pp. 3–10.
6. *Shishkin Yu.E. and Skatkov A.V.* Intellektual'naya sistema adaptivnogo vybora skenariyev parametricheskogo obnaruzheniya divergentsiy dannykh monitoringu (Intelligent system for adaptive selection of scenarios for parametric detection of monitoring data divergences) // *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2019, No. 2 (36), pp. 37–42. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-2-37-42
7. *Bezuglov D.A. and Yukhnov V.I.* Nelineynyye preobrazovaniya metrologicheskikh kharakteristik avtonomnykh sredstv izmereniy (Nonlinear transformations of metrological characteristics of autonomous measuring instruments) // *Nauchnyy al'manakh*, 2015, No. 10-3 (12), pp. 36–38.
8. *Skatkov A.V., Bryukhovetskiy A.A., and Moiseev D.V.* Diskriminantnyy podkhod k obnaruzheniyu anomalii s ispol'zovaniyem markovskikh posledovatel'nostey (Discriminant approach to anomaly detection using Markov sequences) // *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2019, No. 4 (38), pp. 43–49. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-4-43-49
9. *Krevchenko Yu.R.* Osnovy proektirovaniya priborov i sistem. Novochoerkassk, 2006, 72 p.
10. *Tkhishev A.N., Gorshkov P.S., and Golovkin A.P.* Informatsionnaya bezopasnost' v mobil'nykh modularnykh izmeritel'nykh kompleksakh (Information security in mobile modular

measuring complexes) // Nauchnyy vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviatsii, 2017, Vol. 20, No. 6, pp. 99–110.

11. *Grubo E.O. and Korolev P.G.* Metodika rascheta metrologicheskogo resursa izmeritelnogo kanala dlya sredstv izmereniy s avtomaticheskoy korektsiyey (Methodology for calculating the metrological resource of the measuring channel for measuring instruments with automatic correction) // Sbornik dokladov 63-y Nauchno-tekhnicheskoy konferentsii profesorso-prepodavatel'skogo sostava universiteta. SPb., 2010, pp. 228–233.

12. *Skatkov A.V., Bryukhovetskiy A.A., and Moiseev D.V.* Mera Kul'baka v zadachakh dinamicheskoy klasterrizatsii nablyudeniy sostoyniya okruzhayushchey sredy (Kulback measure in problems of dynamic clustering of environmental state observations) // *Sistemy kontrolya okruzhayushchey sredy*, 2019, No. 3 (37), pp. 35–38. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-3-35-38

13. *Yefremov L.V.* Zapas metrologicheskoy nadezhnosti kak kriteriy otsenki ispravnosti sredstv izmereniy (Metrological reliability margin as a criterion for assessing the correctness of measuring instruments) // *Izvestiya vuzov. Priborostroeniye*, 2010, Vol. 53, No. 7, pp. 51–53.

14. *Severtsev N.A., Betzkov A.V., and Darina A.N.* Metody i modeli sozdaniya avtomatizirovannykh sredstv kontrolya dlya povysheniya bezopasnosti funktsionirovaniya tekhnicheskikh sistem (Methods and models for creating automated monitoring tools to improve the safety of technical systems) // *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system*, 2019, No. 2 (26), pp. 19–26.

15. *Nikitin V.A. and Boyko S.V.* Metody i sredstva izmereniy, ispytaniy i kontrolya. Uchebnoye posobiye 2-ye izd. pererab. i dop. Orenburg GOU OGU, 2004, 462 p.

16. *Danilov A.A. and Sputnova D.V.* Analiz modeley opisaniya nestabil'nosti sredstv izmereniy (Analysis of models describing the instability of measuring instruments) // 175 let VNIIM im. D. I. Mendeleeva i Natsional'noy sisteme obespecheniya edinstva izmereniy: sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. SPb., 2017, P. 49.

17. *Akimov V.A., Bykov A.A., and Schetinina E.Yu.* Vvedeniye v statistiku ekstremal'nykh znachiy i yeyo primeneniya. Moskva, 2009, 536 p.

18. *Bezuglov D.A. and Yukhnov V.I.* Nelineynyye preobrazovaniya metrologicheskikh kharakteristik avtonomnykh sredstv izmereniy (Nonlinear transformations of metrological characteristics of autonomous measuring instruments) // *Fundamental'nyye issledovaniya*, 2015, No. 11-2, pp. 232–236.

19. *Bezuglov D.A. and Pomortsev P.M.* Avtonomnyye sredstva izmereniy: monografiya; Rostovskaya akad. servisa (fil.), Yuzhno-rossiyskiy gos. un-t ekonomiki i servisa. Rostov-na-Donu, 2007, 168 p.

20. *Yukhnov V.I.* Primneneniye teorii markovskikh protsessov v metrologii (Application of the theory of Markov processes in metrology) // *Vestnik nauchnykh konferentsiy*, 2017, No. 1-4 (17), pp. 120–122.

21. *GOST 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008.* Neopredelennost izmereniya. Rukovodstvo po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniya. (Measurement uncertainty. Guide to the expression of measurement uncertainty) 2017-07-14. M.: Standart inform, 2008. 112 p.