

ПРОБЛЕМЫ И КОНЦЕПЦИИ

УДК 621.317.2

А. И. ЗАЙКО

**СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ
КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА
К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ИЗМЕРЕНИЙ**

Излагается комплексный подход к определению погрешностей измерений. Обобщаются результаты применения его для расчета и экспериментального определения характеристик погрешностей измерительных преобразователей и каналов, восстановления по дискретным отсчетам, вероятностной и спектральной обработки случайных сигналов. Даются рекомендации по оптимизации средств измерений, их анализу и синтезу. *Комплексный подход; погрешность; измерительные преобразователь и канал; эксперимент; перспективы*

**Зайко
Александр Иванович**

проф. каф. теоретич. основ электротехники. Дипл. инж. электронной тех-ки (УАИ, 1970). Д-р техн. наук по информац.-измерит. системам (ЛЭТИ, 1990). Заслуж. изобретатель РБ и РФ. Член-кор. Между-нар. инж. акад. Иссл. в обл. метрологич. обеспечения, анализа и синтеза информац.-измерит. систем

**ВВЕДЕНИЕ**

Исторически влияние каждого фактора на неточность измерений учитывается своей элементарной погрешностью. Так, основная погрешность учитывает только внутреннюю нестационарность средств измерений (СИ). Дополнительные погрешности учитывают влияние каждого внешнего фактора отдельно в статическом режиме. Динамическая погрешность измерений отражает влияние инерционности СИ в установившемся динамическом режиме. Для многозвенных СИ характеристики основной и дополнительной погрешностей находят суммированием характеристик одноименных погрешностей. По полным динамическим характеристикам здесь находят динамические характеристики СИ, с помощью которых затем по выбранным моделям измеряемых сигналов рассчитываются характеристики динамических погрешностей СИ. Погрешности СИ в установившемся режиме измерения при рабочих условиях эксплуатации находят суммированием одноименных характеристик основных, дополнительных и динамических погрешностей. Методические погрешности обработки показаний СИ оцениваются отдельно и суммируются с инструментальными погрешностями. При метрологических испытаниях и поверке находят отдельно основные и дополнительные погрешности СИ, а также их динамические характеристики.

Такое решение проблемы измерений базируется на неоднозначности деления погрешностей на элементарные составляющие. Элементарные погрешности не учитывают переходных режимов измерений и условий эксплуатации. Характеристики элементарных погрешностей находятся разными методами с использованием различных математических моделей их появления. В результате этого установить зависимость между ними невозможно и учесть ее при суммировании элементарных погрешностей не удастся. При экспериментальном нахождении характеристик погрешностей используются специальные образцовые сигналы и выделить эле-

ментарные погрешности невозможно. Отсутствуют методы и образцовые СИ для проверки на адекватных реальным случайных сигналах. По этим причинам найти достоверные характеристики погрешностей измерений и выполнить Закон о единстве измерений в стране практически невозможно [1].

В статье рассмотрены достижения и перспективы применения для этой цели оригинального комплексного подхода к определению погрешностей измерений.

1. КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ, ЕГО ОТЛИЧИЯ И ПРЕИМУЩЕСТВА

Решить указанную выше проблему можно с помощью комплексного подхода к определению погрешностей. Его идея заключается в том, чтобы рассматривать погрешность СИ как единое и неделимое целое, трансформирующееся с изменением режимов измерений, условий эксплуатации и других факторов. Комплексный подход включает в себя шесть положений, которые подробно рассмотрены в [2, 3].

Отличия и преимущества комплексного подхода по сравнению с существующим поэлементным подходом освещены в статье [1]. Подчеркнем лишь, что он хорошо согласуется с международной концепцией неопределенности измерений [4]. Кроме того, проведена грань между погрешностями и их характеристиками, которые, в свою очередь, делятся на условные и безусловные. Это позволило разделить задачи определения погрешностей и уменьшения их характеристик [5].

История становления комплексного подхода достаточно подробно изложена в [3, 6, 35].

2. АНАЛОГОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ И СТРУКТУРЫ

Аналоговые измерительные преобразователи (ИП) рассматриваются как линейные инерционные звенья, нестационарность которых для инженерных расчетов моделируется с помощью аддитивных и мультипликативных внутренних шумов [7]. Анализ показал, что идентифицируются внутренние шумы, вводимые только двумя методами: аддитивные шумы введены на выходе, а мультипликативные — со входа на выход или только на выходе. Для них разработаны планы экспериментов, приведены алгоритмы измерений динамических характеристик и параметров шумов, даны оценка погрешностей идентификации из-за неточности воспроизведения испытательных сигналов и погрешностей измерений [6].

Задавшись математическими моделями входных сигналов по метрологическим характеристикам ИП, рассчитывают вероятностные характеристики выходных сигналов ИП. По ним с помощью полученных соотношений вычисляют условные и безусловные характеристики погрешностей ИП по входам и выходам. Если характеристики выходных сигналов рассчитываются для динамических сигналов, то есть изменяющихся во времени, то получаются характеристики динамических погрешностей. Если же входные сигналы статические, то есть не изменяются во времени, то получаются характеристики статических погрешностей ИП. Аналогично, если характеристики выходных сигналов рассчитываются для переходных режимов, то есть сразу же после подачи на входы ИП преобразуемых сигналов, то получаются характеристики переходных погрешностей ИП. Если же характеристики выходных сигналов рассчитываются для установившихся режимов, когда переходные процессы в ИП закончатся, то получаются характеристики установившихся погрешностей ИП.

Многозвенную структуру можно разбить на последовательное, параллельное и встречно-параллельное или замкнутое соединения ИП [8, 9, 10]. Для каждой из этих структур получены вероятностные характеристики погрешностей по входу и по выходу, условные и безусловные по шкале, в наиболее общем и сложном случае — переходном режиме измерения и рабочих условиях эксплуатации. Методом декомпозиции в них выделены характеристики и веса погрешностей каждого ИП для последовательной структуры по входу и выходу, параллельной по выходу и замкнутой по входу. Для остальных случаев получены правила комплексирования погрешностей ИП. Как их частные случаи, путем наложения соответствующих условий получены характеристики погрешностей ИП и многозвенных структур во всех режимах измерений и условиях эксплуатации. Это позволяет избавиться от присущего поэлементному подходу суммирования элементарных погрешностей многозвенных структур, которое нельзя выполнить корректно. Оно дает возможность наглядно и объективно оценить долю каждого ИП в погрешностях структу-

ры, найти ИП с наибольшими вкладами в погрешности структур и синтезировать структуры требуемой точности [3].

3. АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ И ЦИФРОАНАЛОГОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) преобразуют аналоговый сигнал в цифровой код. Времяимпульсные и интегрирующие преобразователи можно представить в виде последовательного соединения линейной инерционной части и безынерционного квантователя по уровню [11–13]. Для АЦП поразрядного уравнивания и следящих АЦП аналоговая часть практически отсутствует, и их инерционность обусловлена дискретной частью преобразователей [14, 15]. АЦП описываются условными по шкале характеристиками погрешностей по входу.

Цифроаналоговые преобразователи (ЦАП) наоборот преобразуют цифровой код в аналоговый сигнал. Они рассматриваются как последовательное соединение дискретной части и линейного фильтра. Описываются ЦАП условными по шкале характеристиками погрешностей по выходу.

Другой особенностью АЦП и ЦАП является датирование сигналов измерительной информации во времени. Комплексный подход к определению их погрешностей позволяет найти оптимальное время датирования, минимизировать динамические погрешности преобразователей и выбрать оптимальный шаг квантования по уровню.

4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ КАНАЛЫ

Измерительные каналы (ИК) осуществляют извлечение, преобразование, хранение, передачу и представление измерительной информации потребителю в удобной для него форме. Они включают в общем случае аналоговую часть, АЦП, ЦАП и вычислительные устройства для приведения результатов преобразований ко входу ИК и введения поправок. Последние процедуры можно объединить, воспользовавшись введенными на основе комплексного подхода к определению погрешностей *оптимальными градуировочными характеристиками ИК*. Они позволяют найти наиболее вероятное значение сигнала на входе ИК соответствующее его показанию. При этом среднеквадратические отклонения погрешностей ИК будут минимальны [3]. Предложены три способа экспериментального определения оптимальных градуировочных характеристик [16–18] и одно устройство [19].

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Для экспериментальной проверки положений комплексного подхода к определению погрешностей ИП и ИК разработаны три способа [20–22] и три устройства [23–25]. Они позволяют находить характеристики динамических погрешностей на наиболее близких реальным сигналам случайных процессах. Проведенные эксперименты в четырех организациях различных ведомств и стран показали, что относительные расхождения между результатами эксперимента и результатами расчета характеристик динамических погрешностей не превысили для цифровых ИК 18,5%, а для аналоговых ИК — 21,9% [26–28]. Это, с одной стороны, подтвердило работоспособность предложенных способов экспериментального определения характеристик динамических погрешностей ИП и ИК на случайных процессах, а с другой стороны — доказало достоверность рассчитываемых с помощью комплексного подхода характеристик погрешностей.

Разработанные способы и устройства позволяют использовать их не только при поверке, но и при вступном контроле динамических погрешностей ИП и ИК.

6. ИНФОРМАЦИОННЫЙ КРИТЕРИЙ РАВНОМЕРНОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ

Выбор шага равномерной дискретизации является обязательным при планировании экспериментов с цифровыми ИК. Он зависит от цели измерения и имеющейся априорной информации о сигнале и ИК. Наибольшее распространение получили частотный, корреляционный и квантовый критерии выбора шага дискретизации [29]. При этом шаг дискретизации выбирается по одному из параметров (соответственно граничной частоте, интервалу корреляции и ширине кванта) и оптимум взаимодействия источника случайного сигнала и ИК не гарантируется.

В предложенном информационном критерии выбора шага равномерной дискретизации стационарных случайных сигналов комплексно учитываются свойства источника сигнала и

ИК [30, 31]. Максимальное количество измерительной информации ИК извлекает при шаге дискретизации равном нулю. Увеличение шага дискретизации приводит к уменьшению количества извлекаемой за время эксперимента измерительной информации. Задавшись допустимым относительным количеством информации, выбирают шаг равномерной дискретизации так, чтобы это количество было не меньше допустимого.

При выборе шага дискретизации стационарного нормального Марковского случайного процесса частотный и квантовый критерии дискретизации неприменимы, а корреляционный критерий позволяет извлечь только 17% количества измерительной информации [30]. При дискретизации же Винеровских процессов известные критерии неприменимы, и можно пользоваться только предлагаемым информационным критерием [31].

7. ВОССТАНОВЛЕНИЕ СИГНАЛОВ ПО ДИСКРЕТНЫМ ОТСЧЕТАМ

Задача восстановления сигналов между дискретными отсчетами решается многими методами, обзор которых можно найти в [29]. Наиболее полно априорную информацию о сигналах учитывает восстановление сигнала между дискретными отсчетами по условному математическому ожиданию [32]. Однако известные решения задачи либо не учитывают погрешности отсчетов, либо рассматривают их как аддитивные и независимые от сигналов и методических погрешностей восстановления. При комплексном подходе погрешности отсчетов рассматриваются как частные случаи погрешностей восстановления сигнала при совпадении времени восстановления с моментами датирования отсчетов, а методическая погрешность восстановления рассматривается как частный случай погрешности восстановления при отсутствии погрешностей отсчетов [33, 34, 35].

Полной характеристикой неопределенности сигнала является условная плотность вероятности $w_1[X, t|x_1, \dots, x_n]$ распределения реализации случайной величины в момент времени t при условии, что в моменты времени t_1, \dots, t_n ее отсчеты равны соответственно x_1, \dots, x_n . Вытекающее из него условное математическое ожидание $m[t|x_1, \dots, x_n]$ [35] при симметрии распределения $w_1[X, t|x_1, \dots, x_n]$ является наиболее вероятным значением реализации $x(t)$ случайного сигнала. Поэтому, выбрав восстанавливаемое значение

$$\langle x(t) \rangle = m[t|x_1, \dots, x_n] = \int_{-\infty}^{\infty} X w_1[X, t|x_1, \dots, x_n] dX, \quad (1)$$

можно максимально учесть априорную информацию о сигнале и свести к минимуму погрешность восстановления [35].

Получены восстанавливающие функции и характеристики погрешностей восстановления при нормальных [33] и равномерных [34, 35] законах распределений. Эти результаты учитывают вклады всех составляющих погрешностей и избавляют от необходимости суммировать погрешности отсчетов и методические погрешности восстановления.

8. ИЗМЕРЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Измерение вероятностных характеристик стационарных случайных процессов традиционно основывается на использовании эргодического свойства. Оно дополнено автором определениями одномерной $w_1[X]$ и двумерной $w_2[X_1; X_2, \tau]$ плотностей вероятностей [6, 35, 36]

$$\left. \begin{aligned} w_1[X] &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \delta[X - x(t)] dt; \\ w_2[X_1; X_2, \tau] &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T (\delta[X_1 - x(t)] \delta[X_2 - x(t + \tau)]) dt, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $x(t)$ — реализация случайного процесса; $\tau = t_2 - t_1$, $\tau_{1i} = t_i - t_1$ — временные сдвиги; $2T$ — длительность реализаций; $\delta(X - x)$ — дельта-функция Дирака.

Введены также вытекающие из них функции вероятностей [35]

$$W_1[X] = \int_{-\infty}^X w_1[Y] dY = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T 1[X - x(t)] dt;$$

$$W_2[X_1; X_2, \tau] = \int_{-\infty}^{X_1} \int_{-\infty}^{X_2} w_2[Y_1; Y_2, \tau] dY_1 dY_2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T 1[X_1 - x(t)] 1[X_2 - x(t + \tau)] dt,$$

где $1(X - x)$ — единичная функция.

Из выражений (2) получаются хорошо известные и постулировавшиеся ранее соотношения для математического ожидания m , дисперсии D и корреляционной функции $R(\tau)$ эргодических процессов [6, 35, 36]:

$$\left. \begin{aligned} m &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T x(t) dt; \\ D &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [x(t) - m_x]^2 dt; \\ R(\tau) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T ([x(t) - m_x][x(t + \tau) - m_x] dt). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Наличие погрешностей измерений приводит к тому, что вместо реализации $x(t)$ известна лишь ее оценка $\langle x(t) \rangle$ (1). Погрешность этой оценки характеризуется математическим ожиданием m_δ , дисперсией D_δ и корреляционной функцией $R_\delta(\tau)$. В этом случае вместо дельта-функций в определениях (2) предложено использовать условные плотности вероятности $w_1[X | \langle x(t) \rangle]$ и $w_2[X_1, X_2 | \langle x(t) \rangle, \langle x(t + \tau) \rangle]$. Кроме того, конечное значение имеет и длительность $2T$ реализации $\langle x(t) \rangle$. В результате этого вытекающие из определений (2) алгоритмы измерения оценок плотностей вероятностей получены в виде [35]

$$\left. \begin{aligned} \langle w_1[X] \rangle &= \frac{1}{2T} \int_{-T}^T w_1[X | \langle x(t) \rangle] dt; \\ \langle w_2[X_1; X_2, \tau] \rangle &= \frac{1}{2T - |\tau|} \int_{-T}^{T - |\tau|} w_2[X_1, X_2 | \langle x(t) \rangle, \langle x(t + \tau) \rangle] dt. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Подстановкой значений (4) в определения (3) получены соответствующие оценки математического ожидания $\langle m \rangle$, дисперсии $\langle D \rangle$ и корреляционной функции $\langle R(\tau) \rangle$ в виде

$$\langle m \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} X \langle w_1[X] \rangle dX = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [\langle x(t) \rangle - m_\delta] dt = \langle \langle m \rangle \rangle;$$

$$\langle D \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} [X - m]^2 \langle w_1[X] \rangle dX = \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \{ [\langle x(t) \rangle - m_\delta - m]^2 + D_\delta \} dt = \langle \langle D \rangle \rangle + D_\delta;$$

$$\langle R(\tau) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} [X_1 - m][X_2 - m] \langle w_2[X_1; X_2, \tau] \rangle dX_1 dX_2 =$$

$$= \frac{1}{2T - |\tau|} \int_{-T}^{T - |\tau|} \{ [\langle x(t) \rangle - m_\delta - m][\langle x(t + |\tau|) \rangle - m_\delta - m] + R_\delta(\tau) \} dt = \langle \langle R(\tau) \rangle \rangle + R_\delta(\tau),$$

где $\langle\langle m \rangle\rangle$, $\langle\langle D \rangle\rangle$ и $\langle\langle R(\tau) \rangle\rangle$ — традиционные оценки характеристик случайных процессов [37, 38].

При этом органично, во взаимосвязи друг с другом учитываются погрешности оценки реализации $\langle x(t) \rangle$ (1) и конечная длительность реализации $2T$ при аналоговых измерениях [6]. При цифровых измерениях учитываются погрешности квантования по уровню, влияние шага дискретизации во времени, алгоритмов восстановления реализации процесса между дискретными отсчетами (см. п. 7) и конечный объем выборки [35]. Разработан и официально зарегистрирован во ФГУП «ВНТИЦ» 28.02.07 под № 72200700005 случайный процесс Заико с равномерным законом распределения, позволяющий полнее учесть особенности цифровых измерений.

Полученные результаты позволили распространить эргодическое свойство на многомерные законы распределений [36, 39]. Они дали возможность синтезировать оригинальные алгоритмы цифровых измерений вероятностных характеристик случайных процессов с погрешностями в 2–4 раза меньшими по сравнению с известными алгоритмами [35].

9. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Спектральный анализ получил широкое распространение при исследовании случайных процессов. Рассмотрим два из них — прямой и косвенный.

Прямой метод основан на финитном преобразовании Фурье реализации исследуемого сигнала с последующим осреднением полученного при этом модуля текущего спектра [6, 35, 40]. Поскольку реализация сигнала $x(t)$ практически неизвестна, то вместо нее используем исправленное значение реализации $\langle x(t) \rangle - m_\delta$. Тогда оценка текущего спектра $\langle g(j\omega) \rangle$ примет вид

$$\langle g(j\omega) \rangle = \int_{-T}^T [\langle x(t) \rangle - m_\delta] e^{-j\omega t} dt.$$

Оценка спектральной плотности мощности прямым методом [35, 40]

$$\langle S(\omega) \rangle_{\text{п}} = \frac{1}{2T} \langle g(-j\omega) \rangle \langle g(j\omega) \rangle = \int_{-2T}^{2T} \left(1 - \frac{|\tau|}{2T}\right) \langle\langle B(\tau) \rangle\rangle e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (5)$$

где традиционная оценка ковариационной функции

$$\langle\langle B(\tau) \rangle\rangle = \frac{1}{2T - |\tau|} \int_{-T}^{T-|\tau|} [\langle x(t) \rangle - m_\delta] [\langle x(t + |\tau|) \rangle - m_\delta] dt.$$

Получены математическое ожидание и корреляционная функция погрешности оценки (5). При выводе этих соотношений органично учитываются погрешность измерения и конечная длительность реализации, методическая погрешность [1, 6, 36].

Косвенный метод вытекает непосредственно из теоремы Хинчина–Винера, которая принимает вид [6, 35, 41]

$$\langle S(\omega) \rangle_{\text{к}} = \int_{-\infty}^{\infty} \langle B(\tau) \rangle e^{-j\omega\tau} d\tau = \int_{-T}^T \langle\langle B(\tau) \rangle\rangle e^{-j\omega\tau} d\tau + S_\delta(\omega), \quad (6)$$

где $(-T; T)$ — интервал интегрирования, а спектральная плотность погрешности

$$S_\delta(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} B_\delta(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} R_\delta(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau + m_\delta^2 2\pi\delta(\omega).$$

Найдены математическое ожидание и корреляционная функция погрешности оценки (6). При этом органически интегрально учитываются погрешности измерения и конечное значение аргумента ковариационной функции, а также методическая погрешность косвенного метода.

Сравнительный анализ погрешностей прямого и косвенного методов спектральных измерений с применением комплексного подхода к определению погрешностей позволил найти области применения каждого из этих методов [6, 35].

10. ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

Полученные на основе комплексного подхода погрешности измерений вероятностных и спектральных характеристик случайных процессов позволяют находить оптимальные значения погрешностей измерений и длительностей реализаций при аналоговых измерениях [6].

При цифровых измерениях оптимизируются погрешности квантования по уровню, шаг дискретизации во времени, алгоритм восстановления реализации процесса между дискретными отсчетами (см. п. 8) и конечный объем выборки [35]. Это позволяет балансировать требования к точности измерений между отдельными характеристиками случайных процессов, возможностями СИ, грамотно планировать и осуществлять измерительный эксперимент.

11. ВНЕДРЕНИЯ

В авиационную промышленность. В 1977–87 гг. проводились работы по анализу точностных возможностей СИ для параметров катапультирования и испытаний газотурбинных двигателей на переходных режимах. Они отличались от обычных СИ тем, что измеряли сугубо импульсные параметры и сами СИ находились под влиянием тех же воздействий.

Грамотно оценить результаты летных и стендовых испытаний, принять единственно правильное решение по сертификации перспективных авиационных систем, можно только располагая достоверными характеристиками погрешностей СИ, которые находились расчетным путем с применением комплексного подхода к определению погрешностей СИ. Разработаны методы и методики идентификации СИ, снятия метрологических характеристик, которые являлись исходными данными для расчета характеристик погрешностей аналоговых линейных СИ.

Накопленный опыт обобщен в 4 отраслевых нормативных документах, предназначенных для расчета характеристик погрешностей линейных и нелинейных аналоговых и аналого-цифровых многозвенных СИ в различных режимах измерений случайных и детерминированных сигналов.

Особенностью разработанных нормативных документов является то, что они впервые в практике сопровождались пакетами прикладных программ на языке высокого уровня. Это позволило использовать их для определения точностных возможностей СИ на всех этапах их жизненного цикла.

Разработана и внедрена гамма способов и устройств повышения точности СИ для летных и стендовых испытаний. Применение их позволило свести к минимуму сразу же *результатирующую* погрешность СИ в динамическом режиме при рабочих условиях эксплуатации. Подробнее об этом в статье [1].

В оборонную отрасль. Разработанные нормативные документы одобрены основным заказчиком авиационной техники. Он включил также в 1986 г. несколько документов в сборник типовых методик метрологической экспертизы образцов и комплексов вооружения и военной техники. Два изобретения использованы при разработке зенитно-ракетного комплекса, который в настоящее время является основой ПВО страны.

В нефтяную и газовую отрасль полученные результаты внедрены в виде комплекса рабочих и образцовых СИ, а также методик их аттестации и поверки. Аппаратно-программный комплекс АПИК-1 предназначен для измерения пространственных углов при бурении наклонно-направленных скважин [42, 43]. Рабочим СИ в нем является инклинометр, измеряющий углы Эйлера. Для поверки и настройки инклинометров разработана образцовая установка УПИ-2 [44, 45]. Комплекс и установка прошли испытания и включены в Государственный реестр средств измерений соответственно под №№ 23329-02 и 18969-99.

Для первичной переработки нефти разработаны способ и устройство измерения уровней многокомпонентных сред [46, 47]. Они измеряют расстояние от поверхности до 5 границ между фракциями, что позволяет повысить эффективность разделения этих фракций.

В учебный процесс. Комплексный подход к определению погрешностей, методы и алгоритмы измерения характеристик случайных процессов изучаются в элективном курсе магистрантами УГАТУ [35]. На практических занятиях рассматриваются основная идея, отличия и преимущества такого подхода, а практические навыки его применения отрабатываются при выполнении виртуальных учебно-исследовательских лабораторных работ [48].

12. ПРИЗНАНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Разработанные методы и НТД получили признание у нас в стране и за ее рубежами. Так, основные результаты работы получили «Признание» на X и XVII Всемирных Конгрессах ИМЕКО в г. Прага [49] и Дубровник [50], удостоены наград на международных симпозиумах «Engine Health Monitoring-93» [51] и Technical Committee on Measurement Science-TC 7 [52]. За комплекс нормативно-технических документов и аппаратных средств по метрологическому обеспечению испытаний авиационной техники коллектив награжден Дипломом Почета и 16 медалями ВДНХ СССР [1]. В 2005 г. автор за учебное пособие [35] награжден Дипломом издательской программы «300 лучших учебников для высшей школы в честь 300-летия Санкт-Петербурга», а затем с учебными пособиями [6, 35] стал Лауреатом Всероссийского конкурса «Лучшая научная книга» 2005 и 2006 гг. в номинации «Информационные технологии».

Первое положение комплексного подхода о статических и динамических погрешностях СИ получило законодательное признание в Рекомендациях МИ 2247-93, а затем в РМГ 29-99. Признание остальных положений комплексного подхода, использование и расширение накопленного опыта в дальнейшем позволит успешно решить проблему повышения точности СИ, а следовательно, и качества техники нового поколения, сокращения длительности проектирования и уменьшения стоимости ее производства и испытания [53].

ВЫВОДЫ

Таким образом, комплексный подход к определению погрешностей измерений избавляет от некорректного суммирования элементарных погрешностей, позволяет учесть все многообразие режимов измерений и условий эксплуатации и подтверждается экспериментально. Поэтому синтез ИП и ИК на его основе весьма перспективен.

Накоплен значительный опыт в метрологическом обеспечении уникальных СИ, используемых для летных и стендовых испытаний авиационной техники, экспертизы образцов и комплексов вооружения и военной техники, методик аттестации и поверки измерительных комплексов в нефтяной и газовой отрасли, учебном процессе вуза. Он возник на стыке оригинальных методов анализа, синтеза и способов идентификации СИ на случайных процессах. Внедрение этих работ позволило существенно увеличить достоверность расчета характеристик погрешностей СИ, в 2-10 раз повысить их точность и на четверть века опередить время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Заико, А. И.** Проблемы и концепции метрологического обеспечения испытаний авиационной техники / А. И. Заико // Вестник УГАТУ. 2004. Т. 5, № 2 (10). С. 202-208.
2. **Заико, А. И.** О необходимости общего подхода к определению погрешностей ИС и системного подхода к нахождению их характеристик / А. И. Заико // Приборы и системы управления. 1975. № 11. С. 19-22.
3. **Заико, А. И.** Точность аналоговых линейных измерительных каналов ИИС / А. И. Заико. М.: Изд-во стандартов, 1987. 136 с.
4. **Руководство по выражению неопределенности измерения**: пер. с англ. СПб.: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999. 134 с.
5. **Заико, А. И.** Условные и безусловные характеристики погрешностей средств измерений / А. И. Заико // Метрология. 1984. № 6. С. 12-17.
6. **Заико, А. И.** Теория систем. Стохастические модели: учеб. пособие / А. И. Заико. М.: Изд-во МАИ, 2005. 196 с.
7. **Заико, А. И.** Основы статистической теории электрических цепей: учеб. пособие / А. И. Заико. Уфа: УАИ, 1979. 90 с.
8. **Заико, А. И.** Динамическая погрешность одноканальной многозвенной измерительной системы / А. И. Заико // Изв. вузов. Приборостроение. 1977. № 11. С. 24-28.
9. **Заико, А. И.** Динамическая погрешность многоканальной измерительной системы / А. И. Заико // Изв. вузов. Приборостроение. 1979. № 5. С. 8-12.

10. **Заико, А. И.** Динамическая погрешность системы с обратной связью / А. И. Заико // Изв. вузов. Приборостроение. 1981. № 5. С. 16–20.
11. **Болезенко, В. Н.** Вероятностная модель однокомпараторных время-импульсных аналого-цифровых преобразователей / В. Н. Болезенко, А. И. Заико // Сложные электромагнитные поля и электрические цепи : межвуз. сб. науч. тр. Уфа : УАИ, 1978. Вып. 6. С. 133–136.
12. **Болезенко, В. Н.** Вероятностная модель двухкомпараторных время-импульсных аналого-цифровых преобразователей / В. Н. Болезенко, А. И. Заико // Сложные электромагнитные поля и электрические цепи : межвуз. сб. науч. тр. Уфа : УАИ, 1979. Вып. 7. С. 134–137.
13. **Желтов, М. В.** Математическая модель цифровых частотомеров / М. В. Желтов, А. И. Заико // Сложные электромагнитные поля и электрические цепи : межвуз. сб. науч. тр. Уфа : УАИ, 1978. Вып. 6. С. 137–140.
14. **Заико, А. И.** Динамическая модель аналого-цифрового преобразователя поразрядного уравнивания / А. И. Заико // Измерительная техника. 2000. № 7. С. 53–56.
15. **Заико, А. И.** Динамическая модель следящего аналого цифрового преобразователя / А. И. Заико // Измерительная техника. 2001. № 7. С. 21–24.
16. **Заико, А. И.** А. с. 960689 СССР, МКИ G01R 35/00. Способ определения градуировочной характеристики измерительного устройства / А. И. Заико [и др.]. Заявл. 09.02.81; Опубл. 23.09.82; Бюл. 35.
17. **Заико, А. И.** А. с. 1071982 СССР, МКИ G01R 35/00. Способ определения градуировочной характеристики измерительного устройства / А. И. Заико. Заявл. 03.08.82; Опубл. 07.02.84; Бюл. 5.
18. **Заико, А. И.** А. с. 1071983 СССР, МКИ G01R 35/00. Способ определения градуировочной характеристики измерительного устройства / А. И. Заико. Заявл. 03.08.82; Опубл. 07.02.84; Бюл. 5.
19. **Заико, А. И.** А. с. 1275343 СССР, МКИ G01R 35/00. Устройство для градуировки средств измерений / А. И. Заико, В. М. Лисовский [и др.]. Заявл. 03.07.85; Опубл. 07.12.86; Бюл. 45.
20. **Заико, А. И.** А. с. 890287 СССР, МКИ G01R 35/00. Способ определения статистической погрешности измерительных устройств / А. И. Заико. Заявл. 25.04.77; Опубл. 15.12.81; Бюл. 46.
21. **Заико, А. И.** А. с. 991342 СССР, МКИ G01R 35/00. Способ определения статистической погрешности измерительных устройств / А. И. Заико. Заявл. 17.02.81; Опубл. 23.01.83; Бюл. 3.
22. **Заико, А. И.** А. с. 1071984 СССР, МКИ G01R 35/00. Способ определения статистической погрешности преобразователя с экстраполятором / А. И. Заико. Заявл. 01.11.82; Опубл. 07.02.84; Бюл. 5.
23. **Заико, А. И.** А. с. 824428 СССР, МКИ H03K 13/02. Устройство для автоматического измерения метрологических характеристик цифровых измерительных приборов / А. И. Заико [и др.]. Заявл. 11.03.79; Опубл. 23.04.81; Бюл. 15.
24. **Заико, А. И.** А. с. 940292 СССР, МКИ H03K 13/02. Устройство для автоматического определения динамических характеристик аналого-цифровых преобразователей / А. И. Заико [и др.] (СССР). Заявл. 22.12.80; Опубл. 30.06.82; Бюл. 24.
25. **Заико, А. И.** А. с. 1026298 СССР, МКИ H03K 13/02. Устройство для автоматического измерения метрологических характеристик цифровых измерительных приборов / А. А. Брагин, А. И. Заико [и др.]. Заявл. 24.02.82; Опубл. 30.06.83; Бюл. 24.
26. **Заико, А. И.** Методика и средства автоматизации исследования погрешностей аналого-цифровых преобразователей в динамическом режиме / А. И. Заико [и др.] // Системы автоматизации метрологических исследований : сб. науч. тр. Львов : ВНИИМИУС НПО «Система», 1983. С. 66–75.
27. **Заико, А. И.** Расчетное и экспериментальное определение погрешности АЦП в динамическом режиме при преобразовании случайных сигналов / А. И. Заико [и др.] // Цифровая информационно-измерительная техника : межвуз. сб. науч. тр. Пенза : ППИ, 1984. С. 65–69.
28. **Грязин, А. В.** Экспериментальная проверка общего подхода к определению погрешностей измерительных преобразователей в переходных режимах / А. В. Грязин, А. И. Заико [и др.] // Теория и проектирование систем автоматического управления и их элементов : межвуз. сб. науч. тр. Уфа : УГАТУ, 1996. С. 143–148.
29. **Темников, Ф. Е.** Теоретические основы информационной техники / Ф. Е. Темников, В. А. Афонин [и др.]. М. : Энергия, 1971. 424 с.
30. **Заико, А. И.** Информационный критерий равномерной дискретизации / А. И. Заико // Измерительная техника. 1976. № 9. С. 18–20.
31. **Заико, А. И.** Информационный критерий равномерной дискретизации винеровских процессов / А. И. Заико // Метрология. 1978. № 6. С. 17–20.
32. **Кавалеров, Г. И.** Введение в информационную теорию измерений / Г. И. Кавалеров, С. М. Мандельштам. М. : Энергия, 1974. 376 с.
33. **Заико, А. И.** Определение погрешностей СОИИ при восстановлении случайных сигналов по дискретным отсчетам / А. И. Заико // Измерительная техника. 1984. № 9. С. 13–15.
34. **Заико, А. И.** Восстановление случайного сигнала с равномерным законом распределения / А. И. Заико // Измерительная техника. 1998. № 8. С. 12–14.
35. **Заико, А. И.** Случайные процессы. Модели и измерения / А. И. Заико. М. : Изд-во МАИ, 2006. 207 с.
36. **Заико, А. И.** Определения и алгоритмы измерения характеристик эргодических процессов / А. И. Заико // Метрология. 2003. № 4. С. 3–15.

37. Грибанов, Ю. И. Погрешности и параметры цифрового спектрально-корреляционного анализа / Ю. И. Грибанов, В. Л. Мальков. М. : Радио и связь, 1984. 160 с.
38. Куликов, Е. И. Методы измерения случайных процессов / Е. И. Куликов. М. : Радио и связь, 1986. 272 с.
39. Заико, А. И. Аналоговые измерения многомерных характеристик эргодических случайных процессов / А. И. Заико // Метрология. 1985. № 11. С. 3–6.
40. Заико, А. И. Погрешности цифрового измерения энергетического спектра случайного сигнала прямым методом / А. И. Заико // Метрология. 2001. № 9. С. 3–10.
41. Заико, А. И. Точность измерения энергетического спектра / А. И. Заико // Измерительная техника. 2007. № 7. С. 10–13.
42. Алимбеков, Р. И. Аппаратно-программный комплекс для измерения пространственных углов / Р. И. Алимбеков, А. И. Заико // Измерительная техника. 2004. № 12. С. 27–29.
43. Арсланов, Р. В. Пат. 2184352 РФ, МКИ G01F 23/28. Способ измерения уровней многокомпонентных сред / Р. В. Арсланов, А. И. Заико [и др.]. Заявл. 06.12.00; Оpubл. 27.06.02; Бюл. 18.
44. Алимбеков, Р. И. Пат. 2178522 РФ, МКИ E21B 47/02, G01C 9/00. Установка для настройки и экспериментальных исследований инклинометров / Р. И. Алимбеков, А. И. Заико. Заявл. 01.11.99; Оpubл. 20.01.02; Бюл. 2.
45. Алимбеков, Р. И. Установка для поверки инклинометров УПИ-2 / Р. И. Алимбеков, А. И. Заико [и др.] // Измерительная техника. 2002. № 11. С. 23–24.
46. Арсланов, Р. В. Пат. 2207738 РФ, МКИ H04L 27/14. Способ передачи и приема дискретных сигналов / Р. В. Арсланов, А. И. Заико [и др.]. Заявл. 15.10.01; Оpubл. 27.06.03; Бюл. 18.
47. Арсланов, Р. В. Измерение уровней многокомпонентных сред высокочастотным методом / Р. В. Арсланов, А. И. Заико [и др.] // Измерительная техника. 2002. № 8. С. 24–27.
48. Заико, А. И. Опыт и перспективы применения виртуальных учебно-исследовательских лабораторных работ по теории сигналов / А. И. Заико // Вестник УГАТУ. 2005. Т. 6, № 2 (13). С. 166–174.
49. Zaiko, A. Present state and perspectives of the definition and reduction of errors in information measuring systems / A. Zaiko, L. Kulikovski // Proc. X IMEKO World Congr. 1985. Praga : CSVTS, IMEKO, 1985. V. 7. P. 145–152.
50. Zaiko, A. Accuracy of statistic and spectral measurement / A. Zaiko, N. Zaiko // Proc. XVII IMEKO World Congr. 2003. Croatia, Dubrovnik : HMD Croatian Metrologi Socty, 2003. P. 1275–1279.
51. Zaiko, A. Methods and software for calculation of errors in measuring channels of aviation engine control systems / A. Zaiko, N. Zaiko, A. Sakhigareyev // Engine Health Monitoring 93 : Proc. of the Int. Meeting. M. : CIAM, 1993. P. 14-01–14-04.
52. Zaiko, A. Complex approach to the definition of measurement errors / A. Zaiko, T. Zaiko // Proc. 10th IMEKO TC7 Int. Symp. on Advances of Measurement Science. SPb, Russia, 2004. V. 1. P. 149–152.
53. Заико, А. И. Комплексный подход к определению погрешностей / А. И. Заико // Датчики и системы. 2007. № 8. С. 52–59.