

ВВЕДЕНИЕ

Познание человеком окружающего мира неразрывно связано с наблюдениями и экспериментами. Получение информации в процессе наблюдения и экспериментов базируется на измерениях. На протяжении всей истории развития науки и техники перед человеком возникало и возникает множество вопросов и проблем, для решения которых необходимо располагать количественной информацией о том или ином свойстве объектов материального мира (явлении, процессе, веществе, изделии, теле и др.). Основным способом получения такой информации являются *измерения*, при правильном выполнении которых находится результат измерения, с большей или меньшей точностью отражающий интересующие свойства объекта познания.

Измерения играют важнейшую роль в жизни человека и являются начальной ступенью познания, которое часто не превышает эмпирического уровня. Поскольку критерием истины всегда служит практика (т. е., эксперимент), результаты измерений очень часто выступают в качестве критерия истины. Прогресс науки и техники определяется степенью совершенства измерений и измерительных приборов. Таким образом, измерения служат источником нашего научного и практического познания.

Метрология – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. К основным проблемам метрологии относятся: а) общая теория измерений; б) образование единиц физических величин и их систем; в) методы и средства измерений; г) методы определения точности измерений (теория погрешностей измерений); д) основы обеспечения единства измерений и единообразия средств измерений (законодательная метрология); е) создание эталонов и образцовых средств измерений, ж) методы передачи размеров единиц от эталонов образцовым и далее – рабочим средствам измерений.

Первые измерительные приборы использовались лишь для относительной оценки физической величины. Такое положение сохранялось до тех пор, пока не были определены электрические меры. Вначале эти меры, созданные отдельными учеными в разных странах, не были одинаковыми. Однако это позволяло все же производить измерения, хотя еще и не в общепринятых единицах, и делало возможным взаимное сличение этих мер и сравнение результатов опытов.

Первоначально метрология занималась описанием различного рода мер (линейных, вместимости массы, времени), а также монет, применявшихся в разных странах, и соотношений между ними. Поворотным

моментом в развитии метрологии стало заключение в 1875 г. Метрической конвенции и учреждение Международного бюро мер и весов как центра, обеспечивающего единство измерений в международном масштабе. При этом в широком смысле под единством измерений понимается характеристика качества измерений, заключающаяся в том, что их результаты выражаются в узаконенных единицах, размеры которых в установленных пределах равны размерам воспроизведенных величин, а погрешности результатов измерений известны с заданной вероятностью и не выходят за установленные пределы. Согласно закону Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений», единство измерений – состояние измерений, при котором их результаты выражаются в единицах величин, установленных законодательством, и погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

На международных конгрессах по электричеству (1881, 1893 г.г.) была принята применяющаяся и до нашего времени практическая система электрических и магнитных единиц, базирующаяся на международных единицах ампера и Ома.

Измерения пронизывают все сферы инженерной деятельности. Инженер должен иметь ясное представление о возможностях измерительной техники, чтобы обеспечить взаимозаменяемость изделий, устройств и узлов радиоэлектронной техники. Знание современных стандартов, правил, норм и требований в области измерений также обязательны для специалистов, занимающихся управлением и организацией производства.

Чтобы успешно справиться с многочисленными и разнообразными проблемами радиоизмерений, необходимо освоить ряд общих принципов их решения, определить единую научную и законодательную базу, обеспечивающую на практике высокое качество измерений, независимо от того, где и с какой целью они выполняются. Такой базой является метрология.

1. МЕТРОЛОГИЯ И ЕЕ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ

Предметом метрологии является извлечение количественной информации о свойствах объектов и процессов с заданной точностью и достоверностью. Средства метрологии – это совокупность средств измерений и метрологических стандартов, обеспечивающих их рациональное использование.

Метрология включает общую теорию измерений физических величин, устанавливает и регламентирует единицы физических величин и их системы, порядок передачи размеров единиц от эталонов образцовым и рабочим средствам измерений, методы и средства измерений, общие методы обработки результатов измерений и оценки их точности.

Проблемами создания и применения средств измерений для получения измерительной информации и возникающими при этом научными и техническими вопросами занимается измерительная техника. Фундаментальной основой измерительной техники является метрологическое обеспечение. Метрологическое обеспечение любых измерений лежит на четырех основах: научной, нормативно-технической, организационной и правовой (законодательной).

Для руководства всей деятельностью и поддержания единства измерений в Беларуси создана метрологическая служба, состоящая из Государственной службы, возглавляемой Государственным комитетом по стандартизации (Госстандартом Республики Беларусь), и территориальных центров стандартизации, метрологии и сертификации.

Метрология делится на три самостоятельных, но взаимосвязанных раздела: научную, законодательную и прикладную.

Научная (теоретическая) метрология, являясь базой измерительной техники, занимается изучением проблем измерения в целом и образующих измерение элементов: средств и приборов измерений, физических величин и их единиц, методов и методик измерений, результатов и погрешностей измерений и пр.

Нормативно-технической основой метрологического обеспечения является комплекс государственных стандартов, среди которых:

- Система государственных эталонов единиц физических величин;
- Система передачи размеров единиц физических величин от эталонов или исходных образцовых средств измерений нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений;
- Система разработки, постановки на производство и выпуска в обращение средств измерений, обеспечивающих определение с требуемой

точностью характеристик продукции, технологических процессов и других объектов в сфере материального производства, при научных исследованиях и других видах деятельности;

- Система обязательных государственных испытаний средств измерений;
- Система обязательной государственной и ведомственной поверки или метрологической аттестации средств измерений;
- Система стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, обеспечивающая воспроизведение единиц величин, характеризующих состав и свойства веществ и материалов;
- Система стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов;
- Общие методы нормирования оценки и контроля метрологических характеристик средств измерений.

Организационной основой метрологического обеспечения является метрологическая служба РБ, состоящая из государственной и территориальных метрологических служб, возглавляемых Госстандартом РБ. В своей работе она базируется на основных положениях законодательной метрологии.

Законодательной метрологией называется раздел метрологии, включающий комплексы взаимосвязанных общих правил, требований и норм, а также вопросы регламентации и государственного контроля, направленные на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений.

Важной частью метрологического обеспечения является его *правовая основа*. В каждой стране действуют комплексы государственных стандартов, в РБ они объединены в Систему Обеспечения Единства Измерений (СОЕИ или ГСИ). Благодаря этому установлена единая номенклатура стандартных взаимоувязанных правил и положений, требований и норм, относящихся к организации и методике оценивания и обеспечения точности измерений.

Органы метрологической службы осуществляют надзор за средствами измерений, что обеспечивает их единообразие. В метрологии, как и в любой другой науке, недопустимо произвольное толкование применяемых терминов, поэтому один из основных метрологических документов СТБ П8021-2003 (РМГ 29-99) «СОЕИ РБ. Метрология. Основные термины и определения» (Предварительный государственный стандарт Республики Беларусь) специально регламентирует терминологию в области метрологии.

Практическая (прикладная) метрология посвящена вопросам практического применения разработок теоретической и положений законодательной метрологии.

Качественно новое развитие различных направлений техники вообще и радиотехники в частности предъявляет высокие требования к метрологическому обеспечению и уровню радиоизмерений. В этой связи для метрологии характерны:

- Повышение точности измерений и расширение пределов измеряемых величин;
- Разработка современных методов измерений и приборов с использованием новейших физических принципов и технологий, необходимых для перспективных направлений науки и техники;
- Создание автоматизированных измерительных систем, обладающих высокой точностью, быстродействием и надежностью.

В частности для техники радиоизмерений характерно следующее:

- Чрезвычайно широкий диапазон измеряемых величин (например, по мощности – от долей микроватт до сотен киловатт, по напряжению – от микро вольт и менее до сотен киловольт, по частоте – от 10-2 до 1012 Герц и выше, и т. д.) Поэтому методы измерения одного и того же параметра могут отличаться в зависимости от диапазона частот. От диапазона частот зависит не только метод измерения, но и сам перечень параметров физических величин, подлежащих измерению. Например, в диапазоне радиочастот измеряется обычно напряжение сигнала, а в диапазоне СВЧ – как правило, его мощность. Геометрические размеры объектов измерения отличаются при этом многократно – изделия микроэлектроники и изделия антенной техники.

- Из-за сложности структуры современных электронных систем и устройств и большого количества всевозможных параметров, описывающих их работу, при проведении экспериментов характерно большое разнообразие измерений, необходимость их комплексного проведения, высокое быстродействие и точность, а, следовательно, и автоматизация при статистическом характере проводимых измерений. Совершенно очевидно, что автоматизация значительно повышает точность проводимых измерений. В настоящее время широкое применение в метрологии получила квалиметрия – учение о методах и приемах измерения (точнее, оценивания) качества. В последние годы сформировалось и успешно развивается новое направление в метрологии и радиоизмерительной технике – компьютерно-измерительные системы (КИС) и их разновидности – виртуальные приборы. Виртуальный прибор – это специальная плата, устанавливаемая в персональный компьютер или внешнее устройство, под-

ключаемое через LTP-порт в комплексе с соответствующим программным обеспечением. В зависимости от используемой платы и программного обеспечения пользователь получает измерительный прибор под ту или иную метрологическую задачу. Очевидно, что многие метрологические и исследовательские задачи будут в недалеком будущем решаться с помощью КИС и виртуальных приборов.

Любой объект окружающего мира характеризуется своими *свойствами*. Свойство – философская категория, выражающая такую сторону объекта (процесса, явления), которая обуславливает его общность или различие с другими объектами и обнаруживается в его отношении к ним. Таким образом, свойство – категория качественная. Для количественного описания различных свойств процессов и физических тел вводится понятие величины. Величина – свойство чего-либо, которое может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно. Величина не существует сама по себе, она имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со своими свойствами, выраженными данной величиной. Анализ разных величин позволяет разделить их на два вида: идеальные и реальные. Идеальные величины главным образом относятся к области математики и являются обобщением (моделью) конкретных реальных понятий. Они вычисляются тем или иным способом. Реальные величины делятся на *физические* и *нефизические*. Физическая величина в общем случае может быть определена как величина, свойственная некоторым материальным объектам (процессам, явлениям, материалам), изучаемым в естественных (физика, химия) и различных технических науках. К нефизическим относятся величины, присущие общественным (нефизическим наукам) – философии, социологии, экономике и т. д. *Физическая величина* – свойство, общее в качественном отношении для множества объектов, физических систем, их состояний и происходящих в них процессов, но индивидуальное в количественном отношении для каждого из них. Качественная сторона понятия «физическая величина» определяет «род» величины (например, электрическое сопротивление как общее свойство проводников электричества), а количественная – ее «размер» (сопротивление конкретного проводника). *Числовое значение* результата измерения будет зависеть от выбора единицы физической величины. Следует отметить, что размер физической величины существует объективно, независимо от того, определили мы его или нет, он остается одинаковым, безотносительно того, какое численное значение мы ему приписываем в разных единицах измерения.

Различают физические величины *измеряемые* и *оцениваемые*. *Измеряемые физические величины* можно выразить количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения. *Размерность физической величины* – количественная определенность физической величины, присущая конкретному предмету, системе, явлению или процессу. *Оцениваемые физические величины* – величины, для которых по каким-либо причинам не может быть введена единица измерения, и они могут быть только оценены. *Оценивание* – операция приписывания данной физической величине определенного числа принятых для нее единиц, проведенная по установленным правилам. Оценивание осуществляется при помощи *шквал*. *Шкала величины* – упорядоченная последовательность ее значений, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений. *Значение физической величины* – оценка размера физической величины в виде некоторого числа принятых единиц измерения. *Числовое значение физической величины* – отвлеченное число, выражающее отношение значения величины к соответствующей единице данной физической величины.

Классификация величин может проводиться по различным критериям. Так, например, по видам явлений величины делятся на

- Энергетические (активные), т. е. величины, описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использования энергии. К ним относятся ток, напряжение, мощность, энергия, заряд. Они могут быть преобразованы в сигналы измерительной информации без использования вспомогательных источников энергии.

- Вещественные (пассивные), т. е. описывающие физические и физико-химические свойства веществ, материалов и изделий из них (например, электрическое сопротивление, емкость, индуктивность). Для их измерения необходим вспомогательный источник энергии, с помощью которого формируется сигнал измерительной информации, при этом пассивные физические величины преобразуются в пассивные, которые и измеряются.

- Характеризующие временные процессы. К этой группе относятся различного вида спектральные и поляризационные характеристики, корреляционные функции и пр.

По степени условной независимости от других величин данной группы физические величины могут быть основными, производными и дополнительными. В настоящее время в наиболее распространенной международной системе СИ используется семь физических величин, выбранных в качестве основных: длина, время, масса, температура, сила электрического тока, сила света и количество вещества.

При выбранной оценке физической величины ее можно охарактеризовать *истинным, действительным и измеренным* значениями. Нахождение истинного значения измеряемой физической величины и есть главная проблема метрологии.

Истинным значением физической величины называется значение физической величины, которое идеальным образом бы отражало в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта. Определить экспериментально его невозможно вследствие неизбежных погрешностей измерения. *Погрешность измерения* – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

В связи с тем, что истинное значение физической величины определить невозможно, в практике измерений оперируют понятием *действительного значения*, степень приближения которого к истинному зависит от точности измерительного средства и погрешности самих измерений. *Действительным значением физической величины* называется значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него. Действительное значение физической величины определяют по образцовым мерам и приборам, погрешностями которых можно пренебречь по сравнению с погрешностями применяемых рабочих средств измерения. Под *измеренным значением* понимается значение величины, отсчитанное по отсчетному устройству средства измерения.

Важную роль в процессе измерения играют *условия измерения* – совокупность влияющих величин, описывающих состояние окружающей среды и средства измерений. *Влияющая физическая величина* – физическая величина, непосредственно не измеряемая средством измерения, но оказывающая влияние на него или объект измерений таким образом, что это приводит к искажению результата измерения.

В метрологии различают нормальные, рабочие и предельные условия измерений. *Нормальные условия измерений* – это условия измерения, характеризующие совокупностью значений или областей значений влияющих величин, при которых изменением результата измерений пренебрегают вследствие малости. Нормальные условия измерений устанавливаются в нормативных документах на средства измерения конкретного типа или по их поверке или калибровке. *Рабочие условия измерений* – это условия, при которых значения влияющих величин находятся в пределах *рабочих областей*. При этом рабочая область значений влияющей величины определена как область значений, в пределах которой нормируется

дополнительная погрешность или изменение показаний средства измерения. *Предельные условия измерений* – условия, характеризующиеся экстремальными значениями измеряемой и влияющих величин, которые средство измерений может выдержать без разрушений или ухудшения его метрологических характеристик.

Единица физической величины – физическая величина фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное 1, и применяемая для количественного выражения однородных с ней физических величин.

Единицы физических величин разделяются на *основные* и *производные* и объединяются в соответствии с принятыми принципами в *системы единиц физических величин*.

Единица измерения должна быть установлена для каждой из известных физических величин, при этом необходимо учитывать, что многие физические величины связаны между собой определенными зависимостями. Поэтому только часть физических единиц и, соответственно, их единиц, могут определяться независимо от других. Такие величины являются основными. Остальные физические величины (производные и дополнительные) определяются с использованием физических законов и зависимостей через основные величины.

Международная система единиц (система СИ) была принята XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 году. На территории Республики Беларусь система единиц СИ установлена соответствующим Межгосударственным стандартом ГОСТ 8.417-2000 «ГСОЕИ. Единицы величин».

К основным характеристикам системы СИ следует отнести универсальность, унификацию всех областей и видов измерений, когерентность величин, упрощение записи формул, единую систему образования кратных и дольных единиц, имеющих собственные наименования, лучшее взаимопонимание при развитии научно-технических и экономических связей между разными странами.

В основу Международной системы СИ положены семь основных и две дополнительные единицы: метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль, кандела, две дополнительные – радиан и стерадиан.

Метр – расстояние, которое плоская электромагнитная волна проходит за $1/299792458$ долю секунды.

Килограмм – единица массы, определяемая как масса международного прототипа килограмма, представляющего собой цилиндр из сплава платины и иридия. Современное развитие науки пока не позволяет с достаточной степенью точности связать килограмм с естественными атом-

ными константами. До сих пор килограмм является чисто договорной единицей.

Секунда – 9192631770 периодов излучения, соответствующего энергетическому переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133.

Ампер – сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 метр один от другого в вакууме, вызывал бы силу взаимодействия, равную 2×10^{-7} Н на каждом участке проводника длиной 1 метр.

Кельвин – единица термодинамической температуры, равная $1/273,15$ части термодинамической температуры тройной точки воды, т. е. температуры, при которой три фазы воды – парообразная, жидкая и твердая – находятся в термодинамическом равновесии.

Моль – количество вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится в углероде-12 массой 0.012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, ионами, электронами и другими частицами или группами частиц.

Кандела – сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540×10^{12} Гц, чья энергетическая сила излучения в данном направлении составляет $1/683$ Вт/ср.

Дополнительные единицы международной системы СИ предназначены и используются для образования единиц угловой скорости, углового ускорения.

Производные единицы системы СИ образуются из основных и дополнительных единиц.

Производные единицы бывают *когерентными и некогерентными*. Когерентной называется производная единица физической величины, связанная с другими единицами системы уравнением, в котором числовой множитель принят равным единице. Например, скорость $v = s/t$. Если это условие не выполняется, производная единица называется некогерентной.

В системе СИ были установлены десятичные *кратные и дольные* единицы этой системы, образуемые с помощью множителей.

Кратная единица ФВ – единица, большая в целое число раз системной, дольная единица ФВ – единица, меньшая в целое число раз системной. Наименования кратных и дольных единиц системы СИ содержат ряд определенных приставок, соответствующих множителям.

Таблица 1

Основные и дополнительные единицы Международной системы СИ

Величины		Единицы		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
Основные единицы				
Длина	L	метр	m	м
Масса	M	килограмм	kg	кг
Время	T	секунда	s	с
Сила электрического тока	I	ампер	A	А
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	K	К
Количество вещества	N	моль	mol	моль
Сила света	J	кандела	cd	кд
Дополнительные единицы				
Плоский угол	-	радиан	rad	рад
Телесный угол	-	стерадиан	sr	ср

2. ИЗМЕРЕНИЯ. ЭТАЛОНЫ

Измерением называется процесс нахождения значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Метрологическая суть измерения сводится к основному уравнению метрологии:

$$A = kA_0,$$

где A – значение измеряемой величины; A_0 – значение величины, принятой за образец, k – отношение измеряемой величины к образцу.

Любое измерение заключается в сравнении путем физического эксперимента данной величины с некоторым ее значением, принятым за единицу сравнения, с так называемой *мерой*. Получаемая при измерениях физических величин информация называется *измерительной*. Измерять можно лишь свойства реально существующих объектов познания, отражаемые физическими величинами. Измерение основывается на экспериментальных процедурах. Никакие теоретические рассуждения или расчеты сами по себе не могут классифицироваться как измерение.

Измерения как экспериментальные процедуры классифицируются по разным признакам. Например, по способу нахождения искомого значения измеряемой величины различают *прямые, косвенные, совместные*

и совокупные измерения. Прямое измерение – измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно по показаниям средства измерений (пример – измерение тока амперметром, промежутка времени – секундомером и т. д.). Косвенное измерение – измерение, при котором искомое значение величины находят расчетом на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, функционально связанными с искомой и определяемыми посредством измерений. Совместные измерения – одновременные измерения двух и более разнородных величин для установления зависимости между ними. Совокупные измерения – производимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин.

Измерения бывают однократными (или простыми), и многократными (или статистическими).

По режиму работы средства измерения различают статические и динамические измерения. Если показания средства измерения не зависят от его динамических свойств, или когда этой зависимостью можно пренебречь, говорят, что средство измерения работает в статическом режиме, а само измерение называют статическим. В противном случае измерение называют динамическим.

Под методом измерений понимают совокупность приемов использования принципов и средств измерений, выбранную для решения конкретной измерительной задачи. В понятие метода измерений входит и теоретическое обоснование принципов измерения, и разработка приемов применения средств измерения.

*Средства измерений – технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики, т. е. характеристики, влияющие на результат измерения. По конструктивному исполнению и форме представления измерительной информации средства измерений подразделяются на *меры, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы, измерительные преобразователи*.*

Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения одного или нескольких фиксированных значений физической величины.

Измерительный прибор – средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. В зависимости от формы представления сигнала различают аналоговые и цифровые приборы.

Измерительная установка – совокупность функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, предназначенная для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем и расположенная в одном месте.

Измерительная система – совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в системах управления, контроля, диагностики и пр. Их условно делят на информационно-измерительные системы (ИИС), измерительно-вычислительные комплексы (ИВК) и компьютерно-измерительные системы (КИС).

Измерительный преобразователь – средство измерений, предназначенное для преобразования сигналов измерительной информации в форму, целесообразную для передачи, обработки и хранения. Измерительная информация на выходе измерительного преобразователя, как правило, недоступна для непосредственного восприятия наблюдателем. Все измерительные преобразователи обладают нормированными метрологическими характеристиками.

По реализации процедуры измерения средства измерений бывают элементарными и комплексными. Элементарные предназначены для реализации отдельных операций прямого измерения. Комплексные средства измерений предназначены для реализации всей процедуры измерения.

По отношению к измеряемой физической величине средства измерений подразделяются на основные (средства измерения той величины, значение которой необходимо получить в соответствии с измерительной задачей) и вспомогательные (средства измерений той величины, влияние которой на основное средство измерений или объект измерений необходимо учесть для получения результатов требуемой точности).

По роли, выполняемой в системе обеспечения единства измерений, средства измерений подразделяются на метрологические и рабочие. Метрологические – предназначены для воспроизведения и (или) хранения единицы или передачи размера единицы рабочим средствам измерений. Рабочие – предназначены для измерений, не связанных с передачей размера единиц.

По уровню автоматизации – неавтоматические, автоматизированные (производящие в автоматическом режиме одну или часть измерительной операции) и автоматические (производящие в автоматическом режиме

измерения и все операции, связанные с обработкой их результатов, регистрацией, передачей данных или выработкой управляющих сигналов).

По уровню стандартизации – на стандартизованные (т. е. изготовленные в соответствии с требованиями соответствующего государственного или иного стандарта) и нестандартизованные (или уникальные, т. е. применяемые для решения специфических измерительных задач в специальных направлениях науки и техники).

Средства измерений, предназначенные для воспроизведения и хранения единиц измерений, поверки и градуировки приборов делятся на эталоны и образцовые средства измерения. *Эталон* – средство измерения (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и (или) хранение единицы физической величины с наивысшей точностью для данного уровня развития измерительной техники с целью передачи ее размера нижестоящим по поверочной схеме средствам измерений. Перечень эталонов не повторяет перечня физических величин. Для ряда единиц эталоны не создаются из-за того, что нет возможности непосредственно сравнить соответствующие величины, например, нет эталона площади. Не создаются эталоны и в том случае, если единица величины воспроизводится с достаточной точностью на основе сравнительно простых средств измерений других физических величин.

Эталон должен обладать, по крайней мере, тремя взаимосвязанными свойствами: неизменностью, воспроизводимостью, сличаемостью. *Неизменность* – свойство эталона удерживать неизменным размер воспроизводимой им единицы физической величины в течение длительного интервала времени. При этом все измерения, зависящие от внешних условий, должны быть строго определенными функциями величин, доступных точному измерению. *Воспроизводимость* – возможность воспроизведения единицы физической величины с наименьшей погрешностью для существующего уровня развития измерительной техники. *Сличаемость* – возможность сличения с эталоном других средств измерений, нижестоящих по поверочной схеме с наивысшей точностью для существующего уровня развития техники измерений.

Эталоны классифицируют в зависимости от метрологического назначения. *Первичный эталон* – эталон, обеспечивающий воспроизведения единицы с наивысшей в стране точностью (к первичным относятся специальные, государственные, национальные и международные эталоны). *Вторичные эталоны* – эталоны, значение которых устанавливают по первичному эталону. Создаются и утверждаются в случае необходимости для проведения поверочных работ, а также для меньшего износа первичных эталонов. Делятся на эталоны-свидетели (для проверки со-

хранности и неизменности первичных эталонов, замены их в случае утраты или порчи, имеется только у килограмма), эталоны-копии (предназначенные для передачи размера единицы рабочим эталонам), эталоны сравнения (применяются для взаимного сличения эталонов, которые по тем или иным причинам нельзя непосредственно сравнить между собой, например, международные сличения эталонов), рабочие эталоны (предназначены для поверки образцовых и наиболее точных рабочих средств измерения). Последние при необходимости разделяются на разряды, определяющие порядок их соподчинения в соответствии с поверочной схемой.

Совокупность всех перечисленных эталонов создает эталонную базу страны.

3. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

Цель любых измерений – получение результата, то есть оценка истинного значения физической величины. Однако какими бы точными и совершенными ни были средства измерений и методы измерений, и как бы тщательно измерения ни выполнялись, их результат всегда отличается от истинного значения измеряемой физической величины, т. е. находится с некоторой погрешностью. Для оценки степени приближения к истинному значению используют положения теории вероятностей. Эта теория дает возможность оценивать вероятностные границы погрешностей, за пределы которых они не выходят. Достоверность (или точность) измерений характеризует степень доверия к полученным результатам измерений. Это позволяет для каждого конкретного случая выбирать методы и средства измерений, обеспечивающие получение результата с заданной точностью.

Оценивая погрешности измерения, следует понимать, что уровень точности, к которому необходимо стремиться, должен определяться критериями технической и экономической целесообразности. В метрологии установлено, что увеличение точности измерений вдвое удорожает само измерение в 2–3 раза. В то же время снижение точности измерения ниже определенной нормы, как в науке, так и в производстве приводит к непризнанию результатов, браку производимых изделий и т. д.

При установлении точности измерений важно учитывать также их значимость. В одних случаях недостаточная точность получаемой измерительной информации имеет небольшое или локальное значение, в дру-

гих – играет исключительно важную роль: от точности измерения могут зависеть здоровье и жизнь людей или судьба научного открытия.

Погрешности появляются из-за несовершенства применяемых методов и средств измерений, непостоянства влияющих на результат измерения физических величин и индивидуальных особенностей экспериментатора. На точность измерений влияют также внешние и внутренние помехи, климатические условия и порог чувствительности измерительного прибора.

Результатом прямого однократного измерения является непосредственное показание средства измерения. При этом за погрешность результата измерения принимают погрешность средства измерения. В случае многократных наблюдений результат измерения и его погрешность находят различными методами статистической обработки всех выполненных измерений. Измерение можно считать законченным, если найден не только результат измерения, но и проведена оценка его погрешности. Итак, погрешность измерений – это отклонение результата измерений от истинного значения измеряемой величины.

Погрешность – одна из основных характеристик результата измерения. Она должна быть обязательно оценена. Для различных видов измерения проблема оценки погрешности может решаться по-разному. Погрешность результата измерений можно оценить с разной точностью на основании различной исходной информации. В соответствии с этим различают измерения с *точной, приближенной и предварительной оценкой погрешностей*. При определении точной оценки погрешности учитывают индивидуальные метрологические средства и характеристики каждого из примененных средств измерений, анализируют метод измерений, контролируют условия измерений с целью учета их влияния на результат измерений. При приближенной оценке погрешности – учитывают метрологические характеристики средств измерения и оценивают влияние на результат только отклонение условий измерения от нормальных. Измерения с предварительной оценкой погрешности выполняется по типовым методикам, регламентированным нормативными документами, в которых указаны методы и условия измерений, типы и погрешности используемых средств измерений и на основе этих данных заранее оценена возможная погрешность результата.

Основные признаки, по которым классифицируются погрешности:

1. По форме количественного выражения:

- *абсолютная погрешность* – отклонение результата x от x_u – истинного (или x_0 – действительного) значения измеряемой величины

$$\Delta = x - x_{u(\partial)}$$

Разновидностью абсолютной погрешности является предельная, больше которой погрешность в эксперименте быть не может.

- *относительная погрешность* – отношение абсолютной погрешности к $x_u(x_\partial)$

$$\delta = \frac{\Delta}{x_{u(\partial)}},$$

дает возможность сравнивать качество, т. е. точность измерений. Часто выражается в % :

$$\delta = \frac{\Delta}{x_{u(\partial)}} \cdot 100(\%).$$

- *приведенная погрешность* γ – потенциальная точность измерений,

$$\gamma = \frac{\Delta}{x_N} \cdot 100(\%),$$

где x_N - нормирующее значение (например, конечное значение шкалы).

2. По закономерности появления:

- *систематические погрешности* Δ_c – составляющие погрешности, остающиеся постоянными или закономерно изменяющиеся при многократных измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях. Могут быть выявлены и уменьшены введением поправки или калибровкой полностью исключить не удастся;

- *случайные погрешности* Δ° – составляющие погрешности измерений, изменяющиеся случайным образом по значению и знаку при повторных измерениях одной и той же физической величины в одних и тех же условиях. Неизбежны, неустранимы, всегда имеют место в результате измерения. Их описание и оценка возможны только на основе теории вероятности и математической статистики.

- Их можно уменьшить многократными измерениями и последующей статистической обработкой результатов.

- *грубые погрешности (промахи)* – погрешности, существенно превышающие ожидаемые при данных условиях измерения. При многократных наблюдениях промахи выявляют и исключают из рассмотрения в соответствии с определенными правилами.

Т. е. если исключить промахи, абсолютная погрешность измерения Δ , определяемая как $\Delta = x - x_{u(\partial)}$, представляется как сумма Δ_c и Δ° :

$$\Delta = \Delta_c + \Delta^o,$$

т. е. абсолютная погрешность, как и результат измерения, является случайной величиной.

3. По виду источника погрешности:

- *методические* – возникают из-за несовершенства метода измерений, некорректности алгоритмов или формул, по которым производятся вычисления, отличия принятой модели объекта измерений от верно описывающей его свойства, и вследствие влияния выбранного средства измерений на измеряемые параметры сигналов.

- *инструментальные погрешности* – возникают из-за несовершенства средств измерений, т. е. от их погрешностей (неточная градуировка, смещение нуля и пр.). Устраняется выбором более точного прибора.

- *внешняя погрешность* – связана с отклонением влияющих величин от нормальных значений (влияние влажности, температура, электромагнитных полей и пр.). Этот вид погрешности можно отнести к систематическим и дополнительным погрешностям средств измерения.

- *субъективная погрешность* – вызвана ошибками оператора при отчете показаний. Устраняется применением цифровых средств измерений или автоматических методов измерения.

4. По характеру поведения измеряемой величины в процессе измерений:

- *статические* – возникают при измерении установившегося значения измеряемой величины

- *динамические* – возникают при динамических измерениях. Причина – несоответствия временных характеристик прибора и скорости изменения измеряемой величины.

5. По условиям эксплуатации средства измерения:

- *основная погрешность* – имеет место при нормальных условиях эксплуатации, оговоренных в паспорте или технических условиях средств измерения

- *дополнительная погрешность* – возникает из-за выхода какой-либо из влияющих величин за пределы нормальной области значений.

Аддитивные и мультипликативные погрешности

Термины аддитивные и мультипликативные погрешности служат для описания формы границ полосы погрешностей средства измерений. При проверке средства измерения (прибор, датчик или ИИС) получают ряд значений выходной величины x_i и ряд соответствующих им значений

выходной величины y_i если эти данные нанести на график x, y , то полученные точки разместятся в границах некоторой полосы:

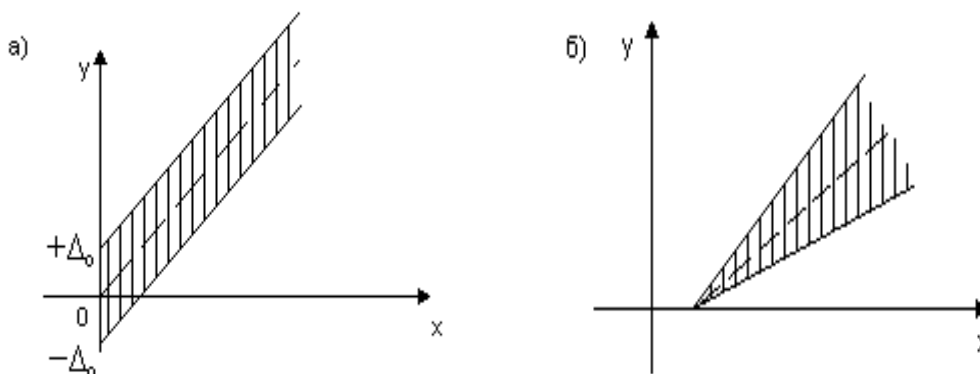


Рис. 1. Виды погрешностей измерений: *а* – аддитивная, *б* – мультипликативная

Если эти точки лежат в границах линий, параллельных друг другу (рис. 1а), т. е. абсолютная погрешность средства измерения во всем диапазоне измерений ограничена постоянным (не зависящим от текущего x_i) пределом $\pm\Delta^0$, то такая погрешность называется аддитивной, т. е. получаемой путем сложения, или погрешностью нуля. Это понятие применимо как к систематическим, так и к случайным погрешностям.

Если же положение границ полосы погрешностей имеет вид клина (рис. 1б), т. е. ширина полосы возрастает пропорционально росту входной величины x_i , а при $x = 0$ также равна нулю, то погрешность называется мультипликативной, т. е. получаемой путем умножения, или погрешностью чувствительности (вне зависимости от того, является погрешность случайной или систематической).

Погрешность квантования – это методическая разновидность погрешности, возникающая в цифровых приборах и дискретных преобразователях. При плавном изменении входной величины x_i (например, напряжения на цифровом вольтметре от 0 до 5 мВ) на выходе получаем набор дискретных значений с некоторым шагом (на выходе – ряд дискретных значений 0-1-2-3-4-5 мВ). Поэтому реальная характеристика цифровых и дискретных преобразователей является ступенчатая кривая. Границы полосы погрешности – параллельные прямые, полоса сохраняет неизменной ширину на всем своем протяжении (рис. 2). Т. к. измеряемая величина x_i случайным образом может принимать любые значения, погрешность квантования также случайным образом принимает значения в интервале от $+\Delta^0$ до $-\Delta^0$. Поэтому погрешность квантования является случайной аддитивной статической погрешностью, т. к. не зависит ни от

текущего значения измеряемой величины x_i , ни от скорости изменения x_i во времени.

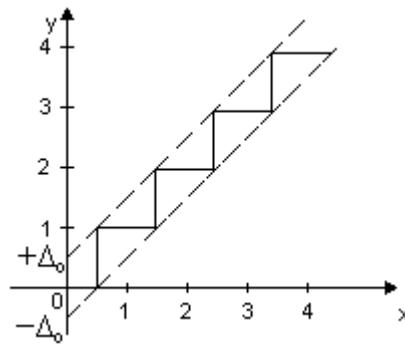


Рис. 2. Погрешность квантования

В основу классификации систематических погрешностей положена закономерность их поведения во времени.

Постоянные – (неизменны во время всей серии измерений, т. е. сохраняются величина и знак.

Переменные – изменяются в процессе измерений. Наличие таких погрешностей искажает оценки характеристик случайной погрешности, т. е. необходимо выявлять и исключать из результатов в измерении. Переменные погрешности можно разделить на монотонно изменяющиеся, периодические, прогрессирующие (непредсказуемая погрешность, медленно меняющаяся со временем).

Отличительные особенности прогрессирующих (дрейфовых) погрешностей.

- их можно скорректировать поправками только в данный момент времени, далее они непредсказуемо меняются;
- изменение дрейфовых погрешностей во времени – нестационарный случайный процесс, который может быть описан весьма приблизительно в рамках теории стационарных случайных процессов.

Систематические погрешности могут измеряться изменяться и по более сложным законам, обусловленными какими-либо внешними причинами.

Основные методы исключения систематических погрешностей

1. *Метод замещения* – замена измеренного значения x_u известной величиной A , получаемой с помощью регулируемой меры, чтобы показание прибора сохранялось неизменным. Погрешность неточного средства измерения устраняется, а погрешность измерения Δ определяется погрешностью отсчета измеряемой величины по указателю меры.

2. *Метод компенсации погрешности по знаку* – выполняются два измерения: $x_1 = x_u + \Delta_c$ и $x_2 = x_u - \Delta_c$, откуда $x_u = \frac{x_1 + x_2}{2}$.

3. *Метод рандомизации* – перевод систематических погрешностей в случайные: некоторая величина измеряется рядом однотипных приборов с последующей оценкой результата измерений в виде математического ожидания (средние арифметические значения) выполненного ряда наблюдений; т. е. от прибора к прибору метод погрешностей изменяется случайным образом.

4. *Метод введения поправок* – поправки определяются экспериментально или путем специальных теоретических исследований и задаются в виде формул, таблиц или графиков (например, этот метод хорош при устранении постоянных инструментальных погрешностей, которые можно выявить при поверке прибора).

5. *Метод симметричных наблюдений* – для выявления и исключения погрешностей, которые являются линейной функцией соответствующего аргумента (амплитуды, напряжения, времени, температуры и пр.). Используются для исключения погрешности, обусловленной, например, постепенным падением напряжения питания.

6. *Графический метод*.

При всех измерениях всегда остаются неисключенные остатки систематических погрешностей.

Случайные погрешности

Аналитически случайные погрешности описывают и оценивают с помощью аппарата теории вероятностей и математической статистики.

Рассмотрим некоторые числовые характеристики случайных величин.

- *Математическое ожидание* случайной величины – это сумма произведений всех ее возможных значений на их вероятности:

$$M(x) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i$$

(математическое ожидание как дискретной так и непрерывной случайной величины есть неслучайная (постоянная) величина).

Вероятностный смысл математического ожидания: математическое ожидание приблизительно равно (тем точнее, чем больше число испытаний N) среднему арифметическому наблюдаемых значений случайной величины:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = M(x) = \sum_{i=1}^{\infty} x_i p_i$$

(или в интегральном виде $M(x) = \bar{x} = \int_{-\infty}^{\infty} xp(x)dx$)

X – обозначение случайной величины, x_i – возможное значение X .

• Для оценки рассеяния возможных значений случайной величины вокруг ее математического ожидания вводится понятие *дисперсии* – математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины от ее математического ожидания:

$$D(x) = M[X - M(x)]^2$$

• *Средним квадратическим отклонением* (СКО) случайной величины x называется квадратный корень из дисперсии:

$$\sigma(x) = \sqrt{D(x)}$$

размерность среднего квадратического отклонения совпадает с размерностью самой случайной величины, поэтому в метрологии обычно используется $\sigma(x)$, а не $D(x)$, которая имеет размерность квадрата случайной величины.

Для характеристики частоты появления различных значений случайной величины X (в нашем случае – погрешности прибора или результата измерения с учетом и ее систематической составляющей) теория вероятностей предполагает пользоваться указанием закона распределения вероятностей различных значений этой величины.

Различают два вида законов: интегральный и дифференциальный.

Интегральным законом или функцией распределения вероятностей $F(x)$ случайной величины x называется функция, значение которой для любого x является вероятностью события, заключающегося в том, что случайная величина X принимает значение, меньше x , т. е.

$$F(x) = P[X < x]$$

Это неубывающая функция x , изменяющаяся так, что $F(-\infty) = 0$, а $F(+\infty) = 1$. Она существует для всех случайных величин, как дискретных, так и непрерывных.

Дискретная случайная величина – величина, которая принимает отдельные изолированные возможные значения с определенными вероятностями. Число возможных значений может быть как конечным, так и бесконечным.

Непрерывная случайная величина – если ее функция распределения есть непрерывная, кусочно-дифференцируемая функция с непрерывной производной.

Для случайной величины с непрерывной и дифференцируемой $F(x)$ можно найти *дифференциальный закон* распределения вероятностей, выражаемый как производная от $F(x)$, т. е.

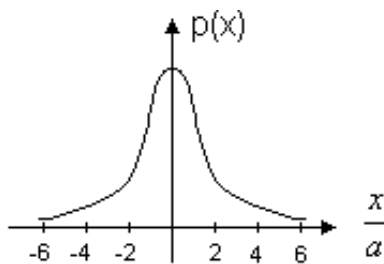
$$p(x) = F'(x)$$

Эта зависимость называется кривой плотности распределения вероятностей. Она всегда неотрицательна, т. е. $p(x) \geq 0$ и подчиняется условию нормировки:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx = 1$$

Примеры законов распределения:

▪ **Распределение Коши**

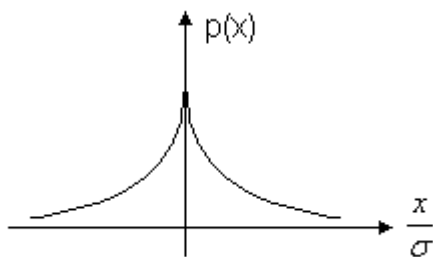


$$p(x) = \frac{1}{a\pi \left[1 + \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right]}$$

Это распределение близко к предельному пологому, т. е. для него выполняется

условие $\int_{-\infty}^{+\infty} p(x) dx = 1$.

▪ **Распределение Лапласа** (двустороннее экспоненциальное).

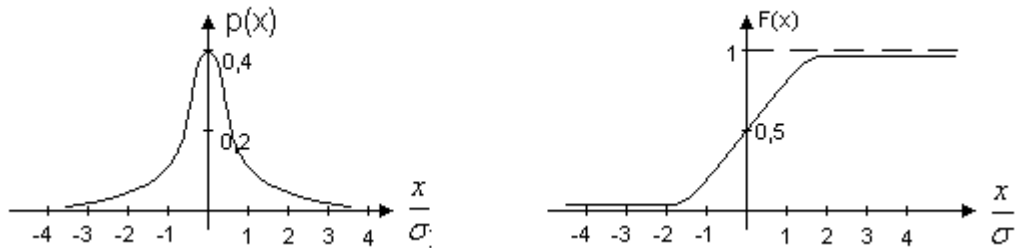


$$p(x) = \frac{1}{2} e^{-|x|}$$

▪ Наиболее часто используемое на практике и в теории вероятностей **нормальное распределение** (распределение Гаусса).

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2\right]$$

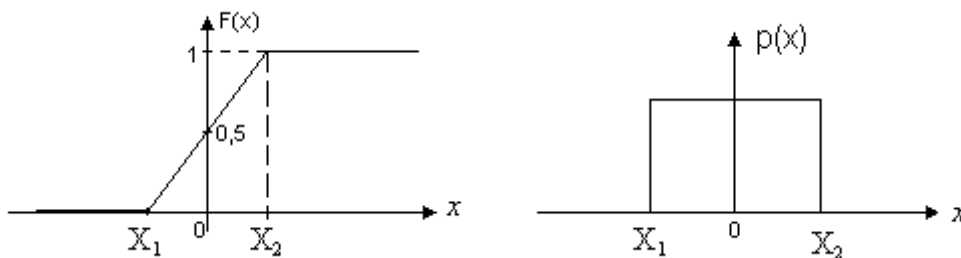
Т. е. по мере удаления от $x = 0$ функция спадает быстрее, чем распределение Лапласа.



Применяется для большого числа наблюдений ($n > 20$).

▪ Если непрерывная случайная величина принимает значения лишь в пределах некоторого конечного интервала значений (x_1, x_2) с постоянной плотностью вероятностей, то такой закон распределения называется **равномерным**. Это распределение характерно для поведения случайных погрешностей при измерении непрерывной величины методом дискретного счета при преобразовании их в АЦП (так называемые погрешности квантования уровней сигналов).

$$\begin{cases} p(x) = \frac{1}{x_2 - x_1} = \text{const} & \text{при } x_1 < x < x_2 \\ p(x) = 0 & \text{при } x < x_1 \text{ и } x > x_2 \end{cases}$$



▪ **Распределение Стьюдента** наиболее часто применяется в процессе обработки результатов небольшого числа ($2 \leq n < 20$) наблюдений случайной величины и справедливо, когда случайные погрешности распределены по нормальному закону. Для него вводится случайная величина:

$$t_x = \frac{\Delta_x}{\sigma_{cp}} = \frac{(\bar{x} - x_u)}{\overline{\sigma}_{cp}},$$

где $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ – оценка средней арифметической x_i , $\overline{\sigma}_{cp}$ – оценка СКО случайной величины $\bar{x}$.

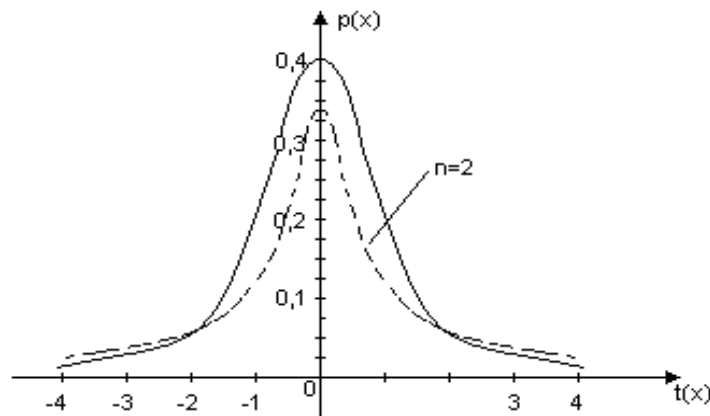
Этот закон учитывает число n наблюдений и задается плотностью распределения вероятностей:

$$p(t_x)|_n = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)\sqrt{\pi(n-1)}} \left(1 + \frac{t_x^2}{n-1}\right)^{-\frac{n}{2}};$$

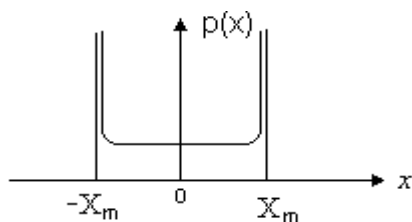
$n \geq 2$ – число наблюдений; $\Gamma\left(\frac{4}{2}\right)$ и $\Gamma\left(\frac{4-1}{2}\right)$ – гамма-функции, (или интегралы Эйлера), которые для некоторого аргумента x определяются как:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-u} u^{x-1} du$$

С ростом n (когда $n \rightarrow 20$) распределение Стьюдента быстро приближается к нормальному и тем значительнее отличается от него, чем меньше n . Отличия состоят в увеличении рассеяния относительных погрешностей t_x относительно центра $t_x=0$ при уменьшении числа наблюдений. Уменьшается также и вероятность попадания погрешностей случайной величины t_x в заданный интервал $(-t_\delta, t_\delta)$.



■ Распределение отсчетов синусоидально изменяющейся во времени величины $x = x_m \sin \omega t$, если моменты этих отсчетов равномерно распределены во времени, называется **арксинусоидальным**.



$$p(x) = \frac{1}{\pi\sqrt{x_m^2 - x^2}}$$

Распределения погрешностей приборов или результатов измерений, как правило, являются симметричными. Поэтому применительно к распределениям вероятностей погрешностей центр распределения может быть определен как центр симметрии распределения.

Координата центра распределения может быть определена несколькими способами. Наиболее общим является определение центра из принципа симметрии, т. е. как точки на оси x , слева и справа от которой вероятности появления различных значений случайной величины равны между собой и составляют $P_1 = P_2 = 0,5$. Такое значение называется медианой.

При симметричной кривой плотности распределения одной из возможных оценок центра распределения может служить абсцисса моды распределения (т. е. максимума плотности). Это возможно лишь в случае, когда распределение имеет моду. Если моды две и более, либо нет вовсе (например, равномерное распределение), то определение центра как моды распределения не имеет смысла.

То же самое относится и к понятию математического ожидания. У ряда распределений, необходимые для вычисления погрешностей, например, косвенных измерений, математического ожидания. Не существует, т. к. соответствующий распределению интеграл расходится (например, распределение Коши), а понятие центра распределения равномерно для любого распределения.

При вероятностном описании погрешности координата центра распределения определяет значение систематической составляющей погрешности, т.е. вероятностное описание погрешностей включает в себя и указание ее систематической составляющей.

Все вышеописанные распределения показаны с координатой центра $x_c = 0$. Если $x_c \neq 0$, изменяется и аналитическое описание плотности распределения вероятностей. Например, распределение Гаусса примет вид:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - x_u)^2}{2\sigma^2}\right].$$

Если же из всех наблюдававшихся значений погрешности вычесть систематическую составляющую, такое распределение называется центрированным.

Для описания различных свойств распределений используют параметры законов распределения, которые называются моментами. Моменты, найденные без исключения систематической составляющей, называются начальными, а найденные для центрированных распределений – центральными.

Центральный момент порядка k непрерывной случайной величины выражается интегралом:

$$\mu_k = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - x_y)^k p(x) dx.$$

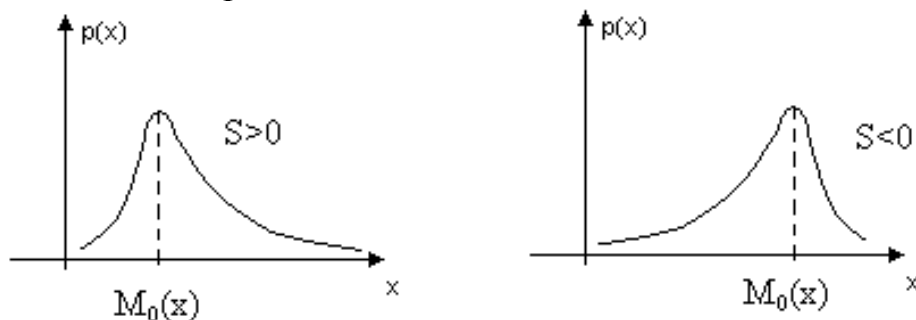
Очевидно, что центральный момент первого порядка – это математическое ожидание, второго порядка – дисперсия (математическое ожидание квадрата ее отклонения):

$$D(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - x_y)^2 p(x) dx.$$

Третий центральный момент μ_3 характеризует асимметрию, т. е. скошенность распределения (когда один спад крутой, а другой – пологий). Для симметричных относительно центра распределений он равен 0. Третий момент имеет размерность куба случайной величины, поэтому для относительной характеристики асимметрии

$$S = \frac{\mu_3}{\sigma^3}.$$

Асимметрия положительна, если «длинная» часть кривой расположена правее моды, и отрицательна, если слева от моды:



Для оценки «крутизны», т. е. большего или меньшего подъема кривой распределения, существует четвертый момент μ_4 . Отношение его к σ^4 называется эксцессом распределения $\varepsilon = \frac{\mu_4}{\sigma^4}$.

Для различных законов распределения эксцесс может изменяться от 1 до ∞ , поэтому для классификации распределений по их форме удобнее пользоваться величиной

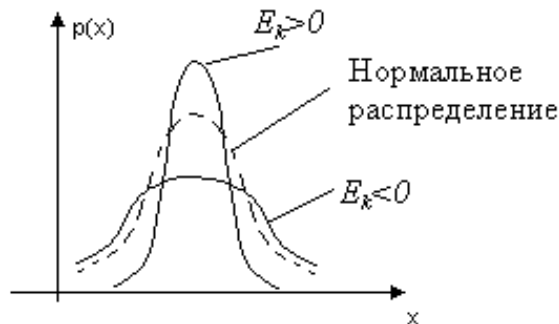
$$\chi = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}},$$

которая называется контрэксцессом и для любых законов распределения имеет величину в пределах от 0 до 1.

Эксцессом теоретического распределения в теории вероятности называют характеристику, которая определяется разностью:

$$E_k = \left(\frac{\mu_4}{\sigma^4} \right) - 3$$

Для нормального распределения $\frac{\mu_4}{\sigma^4} = 3 \Rightarrow E_k = 0$. Поэтому если эксцесс некоторого распределения отличен от нуля, то кривая этого распределения отличается от нормальной кривой (т. е. распределения Гаусса): если $E_k > 0$, то кривая имеет более высокую и острую вершину, чем нормальная кривая, если $E_k < 0$, то кривая имеет более низкую и плоскую вершину, чем нормальная. При этом предполагается, что распределение Гаусса (нормальное) и теоретическое имеет одинаковые математические ожидания и дисперсии.



Особенность законов распределения таких случайных величин как погрешности приборов и результатов измерения состоит в их большом разнообразии. Это вызвано тем, что результирующая погрешность прибора или результата измерения складывается из ряда составляющих. Если эти составляющие рассматривать как случайные величины, то суммирование погрешностей сводится к суммированию случайных величин. Но при суммировании случайных величин законы их распределения резко меняют форму.

Закон распределения суммы независимых случайных величин $p(x) = p(x_1 + x_2)$, имеющих распределения $p_1(x)$ и $p_2(x)$, называются композицией и выражается интегралом свертки:

$$p(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} p_1(z) \cdot p_2(x - z) dz$$

Измерение формы законов распределения при образовании композиций происходит следующим образом:

Рис. 3а при суммировании двух равномерно распределенных погрешностей с шириной распределения $a > b$ результирующая погрешность имеет распределение в виде трапеции с верхним основанием $a - b$ и нижним $a + b$. Данную деформацию можно представить как размывание резко ограниченных хвостов более широкого распределения (шириной a) на величину протяженности в менее широкого распределения.

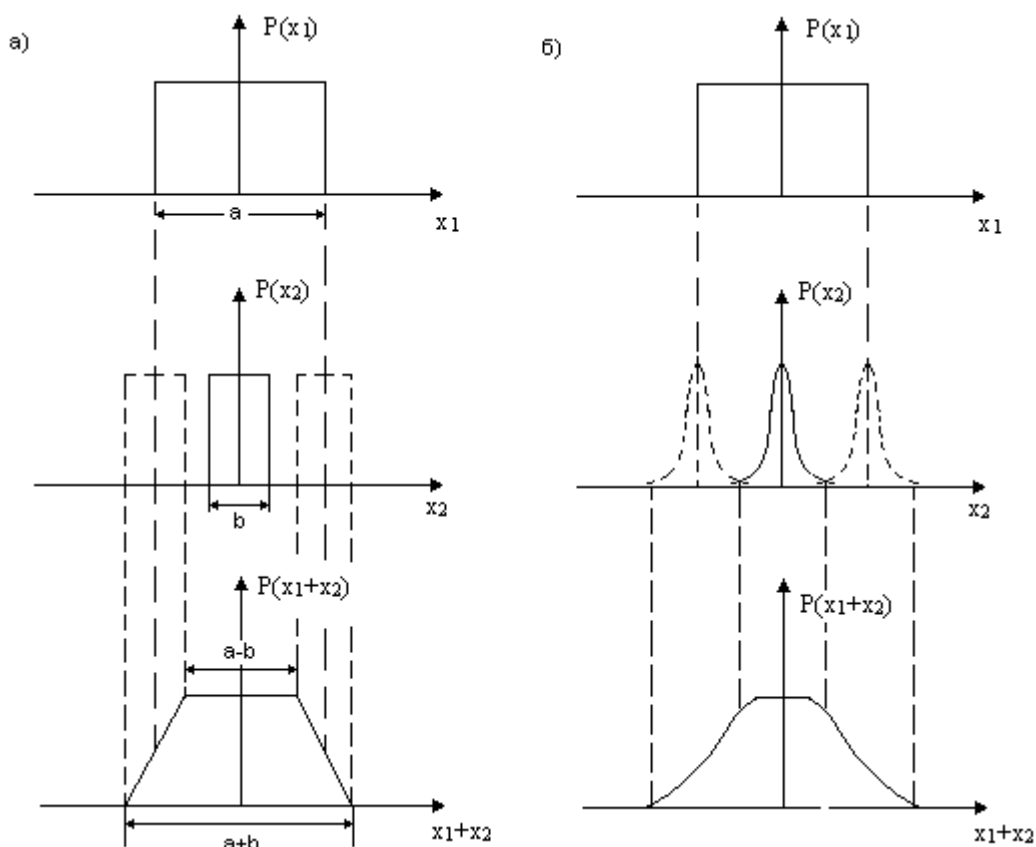
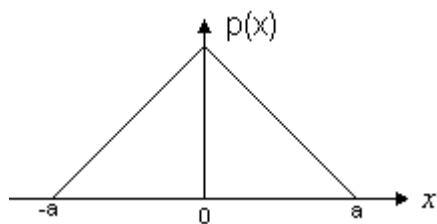


Рис. 3. Композиция распределений a – равномерных, b – равномерного и нормального

Композиция двух одинаковых (с шириной a) равномерных распределений является треугольной:



$$p(x) = \begin{cases} \frac{a+x}{a^2} & \text{при } -a \leq x \leq 0 \\ \frac{a-x}{a^2} & \text{при } 0 \leq x \leq a \\ 0 & \text{при } -a > x; x > a \end{cases}$$

Это так называемое распределения Симпсона. Этот закон распределения характерен для случайных погрешностей цифровых измерительных приборов, в которых измеряемая величина преобразуется в пропорциональный ей интервал времени $T_{сч}$, называемый временем счета. Измерение этого интервала выполняется с помощью счетных импульсов стабильного генератора, имеющих заданный период следования T_c . Положение счетных импульсов относительно интервала $T_{сч}$ является случайным, соотношение между $T_{сч}$ и T_c является также случайным, следовательно максимальные погрешности этих величин равны, т. е. $a_1 = a_2 \Rightarrow$ закон распределения треугольный.

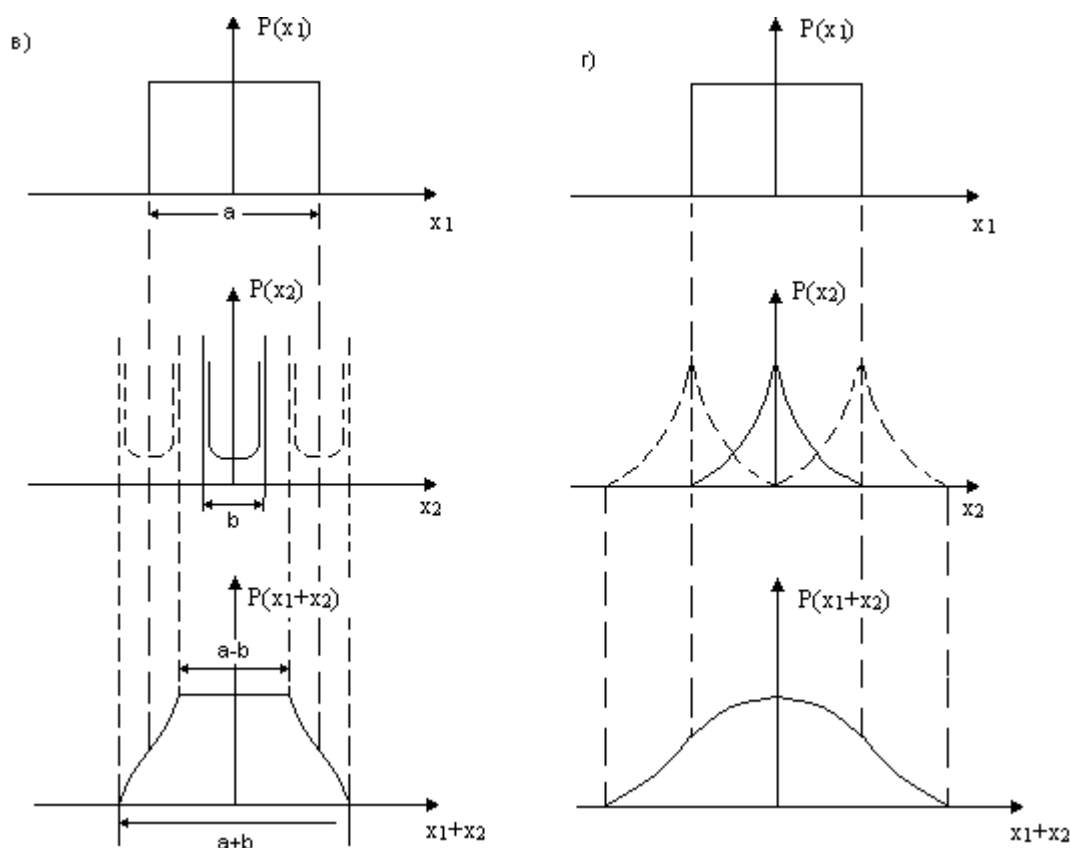


Рис. 4. Композиция распределений в – равномерного и арксинусоидального, г – равномерного и Лапласа

Рис. 3б) Подобным же образом формируется композиция равномерного и нормального распределений, только подъем и спад по краям результирующего распределения проходит по кривой интегрального закона нормального распределения.

Рис. 4в) Композиция равномерного с шириной a распределения и арксинусоидального с шириной b представляет собой криволинейную трапецию с верхним основанием $a - b$ и нижним $a + b$ и спадами по кривым интегрального закона арксинусоидального распределения.

Рис. 4г) Композиция равномерного и распределения Лапласа (двустороннее экспоненциальное) имеет длинные, полого спадающие «хвосты» кривой результирующего распределения.

Реальный масштаб кривых на рисунках 3, 4 определяется каждый раз тем, что площадь под любой из кривых плотности распределения должна быть равна 1.

4. ОЦЕНКА СЛУЧАЙНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ. ПРАВИЛА И ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Для оценки величины разброса случайных погрешностей относительно центра, то есть ширины распределения, на практике используется ряд приемов, приводящих зачастую к существенно разным результатам. Выбор конкретного приема определения погрешности зависит от необходимой полноты сведений о погрешности, назначения измерений, характера использования их результатов. Комплексы оценок показателей точности установлены стандартами.

1. **Предельная** (или максимальная) **оценка** случайной погрешности теоретически правомерна только для ограниченного количества распределений (например, равномерного, трапеципидного, арксинусоидального, треугольного и пр.), для которых действительно существует такое значение $\pm X_m$, которое ограничивает с обеих сторон возможные значения случайной величины. Однако эти распределения являются лишь теоретической идеализацией, и реальные распределения погрешностей, строго говоря, им никогда не соответствуют. Кривые плотности реальных распределений погрешностей, за редкими исключениями, не имеют четко выраженных границ. Поэтому указание для них «предельных» или «максимальных» значений неправомерно. На практике такая оценка есть указание наибольшей погрешности, которая может встретиться при многократных измерениях одной и той же величины. Главным недостатком такой оценки является то, что оно не содержит информации о характере

закона распределения погрешностей, а при арифметическом суммировании предельных погрешностей полученный результат может превосходить действительные погрешности весьма значительно.

2. Более универсальными и информативными являются **квантильные оценки**.

Площадь, заключенная под кривой плотности распределения случайных погрешностей, отражает вероятность всех возможных значений погрешности и по условиям нормирования равна 1. Эту площадь можно разделить вертикальными линиями на части. Абсциссы таких линий называются *квантилями*.

Например, $x = x_1$ (рис. 5), есть 25 %-ная квантиль, так как площадь под кривой $p(x)$ слева от нее составляет 25 % всей площади, а справа – 75 %. Между x_1 и x_2 , то есть между 25 %-ной и 75 %-ной квантилями, называемыми *сгибами* (или *квартилями*) данного распределения, заключено 50 % всех возможных значений погрешности, а остальные 50 % лежат вне этого промежутка.

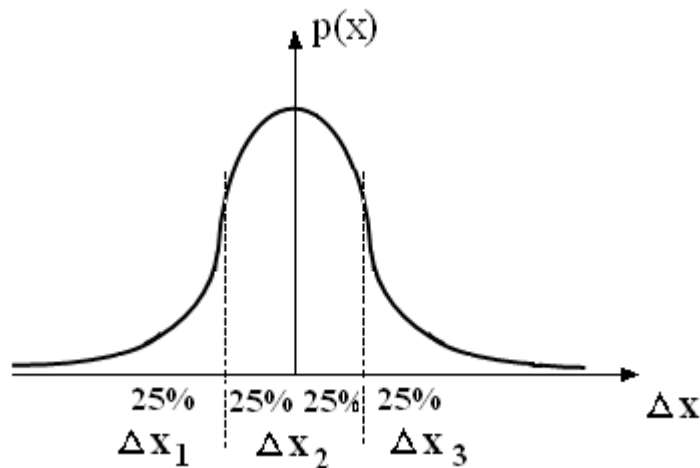


Рис. 5. График плотности распределения случайных погрешностей

Медиана ($x = x_2$) – это 50 %-ная квантиль, так как она делит площадь под кривой $p(x)$ на две равные части.

Квантильная оценка погрешности представляется интервалом от $-\Delta x(P)$ до $+\Delta x(P)$, на котором с заданной вероятностью P встречаются $P \cdot 100\%$ всех возможных значений случайной погрешности. Интервал с границами $\pm \Delta x(P)$ называется *доверительным интервалом* случайной погрешности, а соответствующая ему вероятность – *доверительной вероятностью*.

Таким образом, доверительное значение случайной погрешности есть ее максимальное значение с указанной доверительной вероятностью

P_d , то есть сообщение, что часть реализаций погрешности с вероятностью $1 - P_d = q$ может быть и больше указанного значения погрешности.

Так как квантили, ограничивающие доверительный интервал погрешности, могут быть выбраны различными, то при оценивании случайной погрешности доверительными границами необходимо одновременно указывать значение принятой доверительной вероятности P (например, $\pm 0,3$ В при $P = 0,95$ или $\Delta_{0,95} = \pm 0,3$ В).

Исторически сложилось так, что в разных областях знаний используют различные значения доверительной вероятности, равные 0,5; 0,9; 0,95 и 0,99. Так, например, в области расчета артиллерийской стрельбы общепринятой является срединная ошибка, то есть $P_d = 0,5$, когда 50 % всех возможных отклонений меньше, а остальные 50 % – больше ее.

Доверительная вероятность $P_d = 0,9$ является общепринятой в теории и практике оценки надежности средств измерительной техники.

Погрешность $\Delta_{0,9}$ является обладателем такого уникального свойства, что для широкого класса наиболее употребительных законов распределения вероятностей только она имеет однозначное соотношение со среднеквадратическим отклонением (с.к.о.) в виде $\Delta_{0,9} = 1,6\sigma$ вне зависимости от закона распределения. Поэтому при отсутствии данных о виде закона распределения для определения двусторонней доверительной вероятности СТБ (гостом) предписано использовать $P = 0,9$.

Доверительный интервал $\pm 3\sigma$ соответствует $P = 0,997$, что означает, что практически с вероятностью очень близкой к 1 ни одно из возможных значений погрешности при нормальном законе ее распределения не выйдет за пределы указанного интервала. Поэтому при нормальном законе распределения погрешностей принято считать случайную погрешность с границами $\pm 3\sigma$ *предельной погрешностью*. Погрешности, выходящие за эти границы, классифицируют как грубые или промахи.

В целях единообразия в оценивании случайных погрешностей интервальными оценками при технических измерениях доверительная вероятность принимается $P_d = 0,95$ (соответствующий интервал $\pm \Delta x = \pm 2\sigma$). Более высокую доверительную вероятность принято применять лишь для особо точных (или особо важных) измерений.

Недостатком оценивания случайной погрешности доверительным интервалом при произвольно выбираемых доверительных вероятностях является невозможность суммирования нескольких погрешностей, так как доверительный интервал суммы не равен сумме доверительных интервалов. В то же время, необходимость в суммировании случайных погрешностей существует, когда необходимо оценить погрешность не-

скольких последовательно выполненных измерений, особенно если распределения этих погрешностей подчиняются разным законам.

В теории вероятностей показано, что суммирование статистически независимых случайных величин осуществляется путем суммирования их дисперсий D^1 :

$$D_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n D_i \quad (1)$$

или

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n D_i}$$

безотносительно к разнообразию законов распределения любая из суммируемых величин и деформации законов распределения при образовании композиций.

Таким образом, для того, чтобы отдельные составляющие случайной погрешности можно было суммировать расчетным путем, они должны быть представлены своим СКО, а не предельными или доверительными границами погрешности. Формула (1) правомерна только для независимых случайных величин.

В реальных условиях результат измерения получают либо путем обработки данных ограниченной группы, либо на основе однократного измерения.

Правила обработки данных для получения оценок результата и погрешности статистических измерений определены стандартами Системы обеспечения единства измерений (СОЕИ).

Так все измерительные приборы, средства и системы предназначены для получения измерительной информации, обратимся к некоторым их информационным характеристикам.

Вероятностная теория информации является развитием теории вероятностей применительно к процессам получения и передачи информации и, в частности, к процессам измерений.

«Основная идея теории информации состоит в том, что с информацией можно обращаться почти так же, как с такими физическими величинами как масса и энергия» – К. Шеннон «Математическая теория связи». Однако «почти так же» не означает «точно так же». Например: характеристикой транспортной способности тока с производственной фор-

¹ **Интегральная предельная теорема (теорема Ляпунова):** если случайная величина X представляет собой сумму очень большого числа взаимно независимых случайных величин, влияние любой из которых на всю сумму ничтожно мало, то X имеет распределение, близкое к нормальному.

мой пути при переносе вещества (например, в электролитической ванне) является его среднее значение

$$I_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt. \quad (2)$$

В теории погрешностей его аналогом является определение интервала неопределенности результата измерения с помощью квантильной оценки с заданной вероятностью, когда за интервал неопределенности принимается интервал, в который попадает просто определенный процент всех наблюдаемых отсчетов.

При использовании того же тока для транспортировки энергии получаем другой интеграл:

$$I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt \quad (3)$$

Аналогом его в теории погрешностей является определение дисперсии, при этом аналогом действующего значения тока является с.к.о. погрешности.

Из большого опыта теоретических и практических расчетов интервала неопределенности результатов измерений следует, что этот интервал не имеет однозначного соотношения с оценкой СКО, то есть энергетическая оценка, или оценка мощности помехи не определяет однозначно ее мешающее, дезинформационное влияние на результат измерения. Для коррекции этой неоднородности и приходится при разных законах распределения принимать разные значения доверительной вероятности. Следовательно, существует еще какое-то свойство погрешности, кроме ее мощности, определяемой σ , которое необходимо учитывать. Анализ дезинформационного действия случайных помех с различными законами распределения вероятностей привел к выводу, что вносимая помехой дезинформация определяется не только мощностью этой помехи, но еще и зависит от вида закона распределения этой помехи. Формально это сформулировано в виде следующей теоремы (16-я теорема Шеннона): *если помеха в вероятностном смысле не зависит от сигнала, то независимо от закона распределения и мощности сигнала дезинформационное действие помехи определяется ее энтропией:*

$$H(X) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p(x) \ln p(x) dx,$$

то есть функционалом, отличным по своему виду от (2) и (3).

Итак, согласно теории информации, количество информации I определяется как разность энтропий

$$I = H(X) - H(X / X_{II}),$$

где $H(X)$ – энтропия (мера степени неопределенности) измеряемой величины до ее измерения, а $H(X/X_{II})$ – энтропия действительного значения x измеряемой величины (мера интервала неопределенности) вокруг полученного после измерения X_{II} , то есть энтропия погрешности измерения.

Основное достоинство информационного подхода к вопросу математического описания случайных погрешностей состоит в том, что размер энтропийного интервала неопределенности может быть определен строго математически любого закона распределения, как величина, стоящая под знаком логарифма в выражении для $H(X/X_{II})$.

На практике используют обычно не величину d интервала неопределенности результата, а половину его, которая называется *энтропийным значением погрешности*:

$$\Delta_{\mathcal{E}} = \frac{d}{2}.$$

Соотношение между $\Delta_{\mathcal{E}}$ и с.к.о. σ различно для разных законов распределения. В общем виде его можно представить как

$$\Delta_{\mathcal{E}} = k_{\mathcal{E}} \sigma,$$

где $k_{\mathcal{E}}$ – энтропийный коэффициент данного закона распределения.

Так, для равномерного распределения $\Delta_{\mathcal{E}} = \sqrt{3}\sigma \approx 1,73\sigma$, то есть $k_{\mathcal{E}} = 1,73$; для нормального распределения $\Delta_{\mathcal{E}} = 2,066\sigma$, $k_{\mathcal{E}} = 2,066$; для треугольного распределения $k_{\mathcal{E}} = \frac{\sqrt{6}e}{2} \approx 2,02$; для распределения Лапласа $k_{\mathcal{E}} = 1,93$; для арксинусного распределения $k_{\mathcal{E}} = 1,11$ и так далее.

Максимально возможное значение энтропийного коэффициента $k_{\mathcal{E}} = 2,066$ имеет нормальное распределение. Поэтому для наиболее часто встречающихся на практике распределений энтропийное значение погрешности колеблется от $\Delta_{\mathcal{E}} = 1,11\sigma$ у арксинусного распределения и до $\Delta_{\mathcal{E}} = 2,066\sigma$ у нормального. То есть при одинаковых СКО значения погрешности дезинформационное действие погрешности с любым законом распределения меньше дезинформационного действия погрешности, распределенной по нормальному закону.

В области радиоизмерений можно считать энтропийную погрешность более точной и отвечающей современному информационному подходу к характеристике процесса измерения физических величин. Информационный подход позволяет с единых позиций анализировать измерительные устройства, как в статистическом, так и в динамическом режимах работы, оптимизировать технические характеристики тех или иных средств измерений. Итак, в основе современных подходов к оцениванию

погрешности лежат принципы, обеспечивающие выполнение требований единства измерений.

Для целей исследования и оценивания погрешность описывается с помощью определенной модели (системные, случайные, методические, инструментальные и так далее). На выбранной модели определяют характеристики, пригодные для количественного выражения тех или иных ее свойств. Задачей обработки данных при измерениях и является нахождение оценок этих характеристик. Характеристики погрешности (показатели точности) оценивают приближенно, точность оценок должна согласоваться с целью измерений. Погрешности оценивают сверху, но верхняя оценка должна быть реалистичной, не слишком завышенной. Выбор модели погрешности обуславливается сведениями о ее источниках, как априорными, так и полученными в ходе эксперимента. Модели разделяют на детерминистские и недетерминистские (случайные). Для систематических погрешностей справедливы детерминистские модели, при которых *систематическая погрешность* может быть постоянной величиной, либо известной зависимостью. Общей моделью *случайной погрешности* служит случайная величина, обладающая функцией распределения вероятностей. Характеристики случайной величины (погрешности) делятся на *точные* и *интервальные*. Для описания погрешностей результата измерения чаще всего используют интервальные оценки. Это означает, что границы, в которых может находиться погрешность, находят как отвечающие некоторой вероятности (доверительные интервалы, границы и доверительные вероятности). В некоторых случаях, когда нет возможности или необходимости оценить доверительные границы погрешности (например, неизвестна функция распределения вероятностей погрешности), используют точечные характеристики, которыми являются СКО случайной погрешности, ее дисперсия, математическое ожидание. В целях единообразия представления результатов и погрешностей измерений показатели точности и формы представления результатов измерений стандартизованы. *Стандартом установлено*, что в численных показателях точности измерений (в том числе и погрешности) должно быть *не более двух значащих цифр*. При записи наименования числовые разряды значений результата измерения и его погрешности должны быть одинаковы.

5. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Статистическая обработка результатов измерений – обработка измерительной информации с целью получения достоверных данных. Разнообразие задач, решаемых с помощью измерений, определяет и разнообразие видов статистической обработки их результатов.

Задача статистической обработки результатов многократных измерений заключается в нахождении оценки измеряемой величины и доверительного интервала, в котором находится истинное значение.

Статистическая обработка используется для повышения точности измерений с многократными наблюдениями, а также определения статистических характеристик случайной погрешности.

Для прямых однократных измерений статистическая обработка менее сложна и громоздка, что значительно упрощает оценку погрешностей.

Статистическую обработку результатов косвенных измерений производят, как правило, методами, основанными на раздельной обработке аргументов и их погрешностей, и методом линеаризации.

Наиболее распространенные совместные измерения обрабатываются разными статистическими методами. Среди них широко известен и часто применяется метод наименьших квадратов.

Прямые измерения с многократными наблюдениями

Необходимость в многократных наблюдениях некоторой физической величины возникает при наличии в процессе измерений значительных случайных погрешностей. При этом задача обработки состоит в том, чтобы по результатам наблюдений определить наилучшую (оптимальную) оценку измеряемой величины и интервал, в котором она находится с заданной вероятностью. Данная задача может быть решена способом статистической обработки результатов наблюдений, основанным на гипотезе о распределении погрешностей результатов по нормальному закону. Порядок такой обработки должен соответствовать государственному стандарту и рекомендациям по метрологии.

Правила обработки результатов измерения с многократными наблюдениями учитывают следующие факторы:

- обрабатывается группа из n наблюдений (то есть группа ограничена);
- результаты наблюдений могут содержать систематическую погрешность;
- в группе наблюдений могут встречаться грубые погрешности;

- распределение случайных погрешностей может отличаться от нормального.

Обработка результатов наблюдения производится в следующей последовательности:

- Исключить известные систематические погрешности из результатов наблюдения (введением поправки);
- Вычислить среднее арифметическое исправленных результатов наблюдений, принимаемое за результат наблюдений:

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

- Вычислить оценку среднего квадратичного отклонения результата наблюдения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n-1}}$$

Определив σ , целесообразно проверить наличие в группе наблюдений грубых погрешностей, помня, что при нормальном законе распределения ни одна случайная погрешность $x_i - X$, с вероятностью, практически равной 1, не может выйти за пределы $\pm 3\sigma$. Наблюдения, содержащие грубые погрешности, исключают из группы и заново повторяют вычисления X и σ .

- Вычислить оценку среднего квадратичного отклонения среднего арифметического $S_{\bar{x}}$ по формуле:

$$S_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}{n(n-1)}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

- Проверить гипотезу о том, что результаты измерений принадлежат нормальному распределению.

Приближенно о характере распределения можно судить, построив гистограмму. Существуют и строгие методы проверки гипотез о том или ином характере распределения случайной величины с использованием специальных критериев. Об этом подробнее можно узнать в книге П. В. Новицкий, И. А. Зограф «Оценка погрешностей результатов измерений».

При числе наблюдений $n < 15$ принадлежность их к нормальному распределению не проверяют, а доверительные границы случайной по-

грешности результата определяют лишь в том случае, если достоверно известно, что результаты наблюдений принадлежат нормальному закону.

- Вычислить доверительные границы ε случайной погрешности результата измерения при заданной вероятности P :

$$\varepsilon = t_g S_X ,$$

где t_g – коэффициенты Стьюдента

- Вычислить границы суммарной неисключенной систематической погрешности (НСП) результата измерения. НСП результата измерений образуется из неисключенных остатков измерений, погрешностей, поправок и т. д. При суммировании эти составляющие рассматриваются как случайные величины. При отсутствии данных о виде распределений НСП, их распределения принимают за равномерные. При равномерном распределении НСП границы НСП вычисляют по формуле:

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2} ,$$

где θ_i – граница i -той НСП, k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью (при $P_d = 0,95$, $k = 1,1$); m – число неисключенных составляющих систематической погрешности. Доверительную вероятность для вычисления границ НСП принимают той же, что при вычислении границ случайной погрешности результата измерений.

- Вычислить доверительные границы погрешности результата измерения.

Анализ соотношения между НСП и случайной погрешностью показывает, что если $\frac{\theta}{S_{\bar{x}}} < 0,8$, то НСП можно пренебречь и принять границы

погрешности результата $\Delta = \pm \varepsilon$.

Если $\frac{\theta}{S_{\bar{x}}} > 0,8$, то случайной погрешностью можно пренебречь и принять $\Delta = \pm \theta$. Если оба неравенства не выполнены, вычисляют среднее квадратичное отклонение результата как сумму НСП и случайной погрешности в следующем виде:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3} + S_{\bar{x}}^2} ,$$

а границы погрешности результата измерения в этом случае вычисляют по формуле:

$$\Delta = \pm k S_{\Sigma},$$

где k – коэффициент, определяемый как

$$k = \frac{\varepsilon + \theta}{S_{\bar{x}} + \sqrt{\sum_{i=1}^m \frac{\theta_i^2}{3}}}$$

- Записать результат измерения в регламентированной стандартом форме:

- а) при симметричном доверительном интервале погрешности результата измерения $x \pm \Delta, P$, где x – результат измерения;

- б) при отсутствии данных о виде функции распределения составляющих погрешности результата или при необходимости использования данных для дальнейшей обработки результатов, результат представляют в форме: X, S_x, n, θ .

Из условия, что при $\frac{\theta}{S_{\bar{x}}} > 8$ случайной погрешностью можно пренебречь, следует оценка максимального целесообразного числа наблюдений в эксперименте:

$$\frac{\theta}{S_{\bar{x}}} = 8 \Rightarrow n_{\max} = \left(\frac{8\sigma}{\theta} \right)^2,$$

$$\text{где } \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X)^2}{n-1}}.$$

Прямые однократные наблюдения

Такой вид измерений является наиболее распространенным, когда речь идет о механических измерениях или физическом эксперименте. Однако они возможны лишь при следующих условиях:

- объем априорной информации об объекте измерений такой, что аналитическая модель объекта и измеряемой величины не вызывают сомнений;
- метод измерения достаточно изучен, и его погрешности либо заранее устранены, либо оценены;
- средства измерения исправны, а их метрологические характеристики соответствуют установленным нормам;

- применение методики обработки результатов прямых однократных измерений возможно, если известны составляющие погрешности измерения; закон распределения случайных составляющих – нормальный, а НСП – равномерный с известными границами $\pm \theta$.

Сама методика описана в соответствующих нормативных документах.

Результатом прямого однократного измерения физической величины $x_n = A_n$ является показание, снятое непосредственно с используемого средства измерения. До измерения должна быть проведена априорная оценка составляющих погрешности с использованием всех доступных данных. При определении доверительных границ погрешности результата измерений доверительная вероятность принимается $P_d = 0,95$.

Погрешность результата прямого однократного измерения включает в себя погрешность средства измерения, методы измерения и субъективную погрешность оператора (которую можно легко устранить, применив цифровой прибор, но возникнет погрешность дискретизации). Любая из этих составляющих может иметь и НСП, и случайные составляющие.

Как и при измерениях с многократными наблюдениями, однократный отсчет может содержать грубую погрешность. Во избежание промаха однократное измерение необходимо повторять 2 – 3 раза, приняв за результат среднее арифметическое. (Статистической обработке эти отсчеты не подвергаются). Результат однократного измерения записывается в форме:

$$x_{испр} \pm \Delta$$

Косвенные измерения

При косвенных измерениях искомое значение величины находят расчетом на основе измерения других величин, связанных с измеряемой известной зависимостью: $A = f(a_1, \dots, a_m)$.

Поскольку каждое из a_i измеряется с некоторой погрешностью, то задача оценивания погрешности результата сводится к суммированию погрешностей измерения аргументов. Особенностью косвенных измерений является то, что вклад отдельных погрешностей измерения аргументов в сумму погрешностей результата зависит от вида функции $A = f(a_1, \dots, a_m)$.

Для оценки погрешностей существенно разделить косвенные измерения на линейные и нелинейные. При линейных косвенных измерениях уравнение измерений имеет вид:

$$A = \sum_{i=1}^m b_i a_i \quad (4)$$

где b_i – const при a_i .

Любые другие функции зависимости являются нелинейными.

Результат линейных косвенных измерений находят по формуле (4), подставляя в нее a_i . Погрешности результата могут быть заданы своими границами Δa_i , либо доверительными границами $\Delta a(P_i)$ с доверительными вероятностями P_i .

Если $m < 5$, то простая оценка погрешности результата ΔA может быть получена простым суммированием предельных погрешностей (без учета знака), то есть подстановкой Δa_i в выражение:

$$\Delta A = \Delta a_1 + \Delta a_2 + \dots + \Delta a_m.$$

Однако такая оценка является завышенной, так как такое суммирование означает, что погрешности измерения всех аргументов одновременно имеют максимальные значения и совпадают по знаку. Вероятность такого совпадения стремится к 0. Для определения более реалистичной оценки переходят к статистическому суммированию погрешностей аргументов, полагая, что в заданных границах погрешности аргументов распределены равномерно:

$$\Delta A(P) = k \sqrt{\sum_{i=1}^m b_i^2 a_i^2},$$

где $\Delta A(P)$ – доверительные границы при доверительной вероятности P , k – коэффициент, зависящий от P ($k = 1,1$ при $P = 0,95$)

Нелинейные косвенные измерения характеризуется тем, что результаты измерения аргументов подвергаются функциональным преобразованиям. Как показано в теории вероятностей, любые, даже простейшие, функциональные преобразования случайной величины приводят к изменению законов их распределения.

При сложной функции $A = f(a_1, \dots, a_m)$ отыскание закона распределения погрешности результата связано с серьезными математическими трудностями. Поэтому при нелинейных косвенных измерениях обычно ограничиваются приближенной верхней оценкой ее границ. В основе такой оценки лежит линеаризация функции $A = f(a_i)$ и далее обработка результатов проводится как при линейном косвенном измерении.

Существует несколько правил оценивания погрешности:

1) погрешности в суммах и разностях:

если $A = a_1 \pm a_2$, то $\Delta A = \Delta a_1 \pm \Delta a_2$ (не учитываем знак в A)

- 2) погрешности в произведениях и частных:
если $A = a_1 * a_2$ или $A = a_1 / a_2$, то суммируются относительно погрешности: $\partial A = \partial a_1 \pm \partial a_2$, где $\delta a_i = \Delta a_i / a_i$
- 3) если $A = B * a$ и B не имеет погрешности, то $\partial A = |B| \delta a$
- 4) возведение в степень: если $A = a^n$, то $\delta A = n \delta a$
- 5) если $A = f(a)$, то есть является произвольной функцией a , то:

$$\delta A = \frac{dA}{da} \delta a$$

Для использования этих правил число аргументов должно быть не больше 5.

Для обеспечения единства измерений и взаимозаменяемости средств измерений характеристики их метрологических свойств нормируются и регламентируются стандартами. Номенклатура метрологических характеристик и полнота, с которой они должны описывать те или иные свойства средств измерений, зависят от назначения последних, условий их эксплуатации, режима работы и многих других факторов. В полном перечне метрологических характеристик средств измерений можно выделить следующие группы: градуировочные характеристики (определяют соотношение между сигналами на входе и выходе средства измерений в статическом режиме); показатели точности средства измерений (необходимы для оценки инструментальной составляющей погрешности результата измерений); динамические характеристики (отражают инерционные свойства средства измерений и необходимы для оценки динамических погрешностей измерений); функции влияния (отражают зависимость метрологических характеристик средства измерений от воздействия влияющих величин или неинформативных параметров входного сигнала). Учет всех нормируемых метрологических характеристик средства измерений при оценивании погрешности результата измерений – сложная и трудоемкая процедура, тем не менее, оправданная при проведении измерений с высокой точностью.

Международные рекомендации по выражению неопределенности результата измерений.

В 1986 году вышло в свет «Руководство по выражению неопределенности измерения» Международного Комитета Мер и Весов.

Основные положения «Руководства по выражению неопределенности измерения» заключается в следующем:

- Понятие «погрешность измерения» заменено понятием «неопределенность измерения»;
- Введены понятия неопределенности типа А и В;
- Количество неопределенностей А и В оценивают посредством стандартного отклонения (то есть СКО).

Понятие «неопределенность измерения» определяется как параметр, связанный с результатом измерения, характеризующий дисперсию значений, которые могут быть обоснованно приписаны измеряемой величине.

Неопределенность, оцениваемая путем статистического анализа ряда наблюдений, называется *неопределенностью типа А*.

Неопределенность, оцениваемая любыми иными способами, чем статистический анализ рядов наблюдений, называется *неопределенностью типа В*.

Для определения статистической неопределенности типа В можно использовать всю доступную информацию, например: данные, полученные в предыдущих измерениях, спецификации, выданные производителем, данные, полученные в процессе калибровки, статистические данные из справочной и другой литературы и т. д.

Следует отметить, что по сути дела неопределенность типа А – это характеристика случайной составляющей погрешности результата измерения; а неопределенность типа В – характеристика неисключенной систематической погрешности.

Объединение неопределенностей А и В проводится по тем же правилам, что и при суммировании составляющих погрешностей, то есть путем суммирования дисперсий.

6. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ. КЛАССИФИКАЦИЯ. ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА

Современные средства измерений являются в основном цифровыми, т. е. имеют высокие точности. Именно переход к построению цифровых средств измерений привел к созданию автоматизированных средств измерений. По уровню автоматизации все средства измерений делятся на

неавтоматические, автоматизированные и автоматические. К последним относят и multifunctional цифровые приборы на основе микропроцессоров, а также измерительные системы. *Измерительные системы* (ИС) – это совокупность функционально объединенных средств измерений, компьютерной техники и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенными для выработки сигналов измерительной информации о физических величинах, свойственных данному объекту, в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления. Поскольку структура и назначение современных ИС разнообразна и быстро развивается, дать их полную классификацию весьма сложно. Можно лишь условно разделить их по некоторым характеристикам. Например, в зависимости от функционального назначения ИС делятся на ИС измерения и хранения информации (прямые ИС), контрольно-измерительные ИС, телеизмерительные системы, системы распознавания образов, системы технической диагностики. Прямые ИС (их также называют гибкими) – наиболее бурно развивающиеся и внедряемые системы. Основная их особенность – возможность программной перестройки ИС для измерений различных физических величин и менять режим измерений. При этом нет необходимости изменять аппаратную часть ИС. Условно гибкие ИС можно разделить на информационно-измерительные системы (ИИС), измерительно-вычислительные комплексы (ИВК), компьютерно-измерительные системы (КИС). Все виды ИС должны обладать свойствами технической, информационной и метрологической совместимости, а также допускать возможность дальнейшей модернизации и развития. Применение современных средств схемотехники позволяет уменьшить избыточность информационных потоков, что позволяет осуществить максимально возможный перенос обработки измерительной информации к месту ее формирования, т. е. перейти к конвейерной обработке измерительной информации в распределенной ИИС. В целом такая система состоит из следующих основных частей: системы первичных преобразователей (датчиков); устройств сбора и первичной обработки информации; средств вторичной обработки информации; устройств управления и контроля; устройств связи с другими системами; устройств вывода и/или хранения информации; интерфейсный модуль. Одним из важнейших элементов ИИС и КИС является блок образцовых программно-управляемых мер напряжения и частоты (рис. 6).

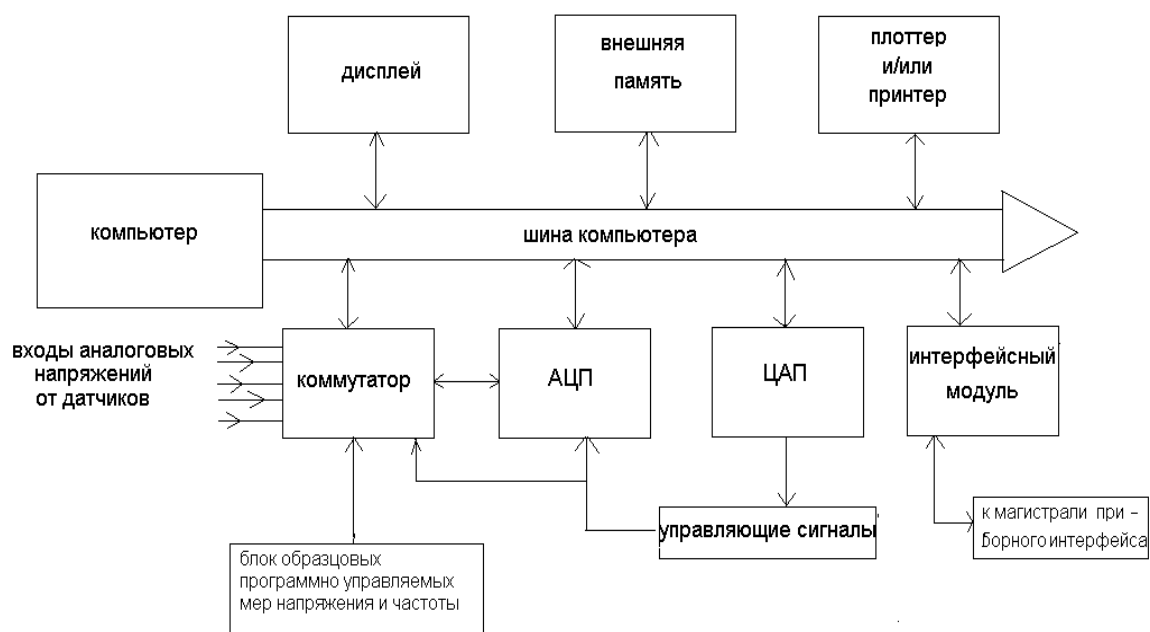


Рис. 6. Обобщенная структурная схема КИС (ИИС)

7. ИНТЕРФЕЙСНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СХЕМЫ

Входные характеристики интерфейсных схем

Если датчик не оснащен встроенной электронной схемой, формирующей выходной сигнал в определенном формате, его практически никогда не удастся напрямую подключить к процессору, монитору или другой регистрирующей аппаратуре. Обычно сигнал на выходе датчика бывает либо слишком зашумленным, либо очень слабым, либо содержит нежелательные составляющие. В дополнение к этому его формат может не соответствовать формату системы приема данных. Для подключения датчика к процессорному устройству, как правило, требуется промежуточное согласующее устройство, т. е. выходной сигнал необходимо преобразовать к определенному виду перед тем как подать на устройство обработки данных (подключить к нагрузке). Для нагрузки входным сигналом обычно является либо ток, либо напряжение. Схема согласования сигналов называется *интерфейсом* между датчиком и последующими устройствами. Ее основная задача – преобразование сигнала датчика в формат, совместимый с нагрузкой. На рис.7 показан внешний сигнал, действующий на датчик, подключенный к нагрузке через интерфейсную схему. Для эффективной работы интерфейса его входные характеристики

должны быть совместимы с выходными параметрами датчика, а выходные – с входным форматом нагрузки. Далее рассмотрим некоторые входные цепи интерфейсных схем.

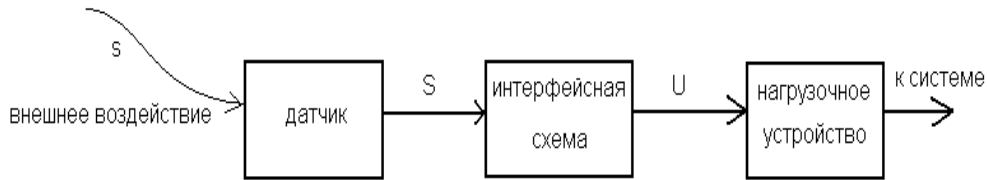


Рис. 7. Интерфейсная схема согласует форматы сигналов датчика и нагрузочного устройства

Входная часть интерфейсной схемы характеризуется несколькими стандартными параметрами, показывающими, насколько точно схема может преобразовывать сигнал датчика и какой вклад она внесет в общую погрешность.

Входной импеданс показывает, насколько сильно интерфейс нагружает датчик. В комплексном виде он может быть выражен как $Z = U/I$, где U и I – комплексные числа, соответствующие напряжению и току через входной импеданс. Например, если входную часть интерфейсной схемы представить в виде параллельного соединения входного сопротивления R и входной емкости C (рис. 8), входной импеданс в комплексном виде можно записать:

$$Z = \frac{R}{1 + j\omega RC}, \quad (5)$$

где ω – циклическая частота, j – мнимая единица. На очень низких частотах схема обладает относительно небольшой входной емкостью, и ее входной импеданс определяется сопротивлением R , поэтому можно считать, что $Z \approx R$, следовательно, реактивная часть уравнения (5) становится очень малой и выполняется соотношение:

$$R \cdot C \ll \frac{1}{\omega}. \quad (6)$$

При рассмотрении входного импеданса интерфейсной схемы всегда необходимо учитывать выходной импеданс датчика. Например, если датчик имеет емкостную природу, для определения частотных характеристик входной части интерфейса емкость датчика должна быть подсоединена параллельно его входной емкости. В (5) показано, что входной импеданс является функцией частоты внешнего сигнала. С увеличением скорости изменения сигнала входной импеданс уменьшается.

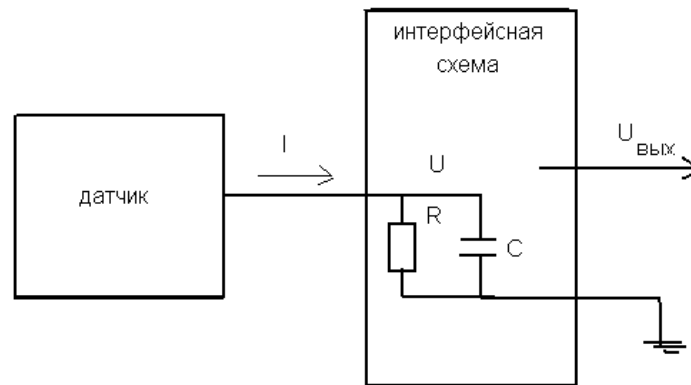


Рис. 8. Комплексный входной импеданс интерфейсной схемы

На рис. 9 представлена эквивалентная схема датчика с выходным сигналом в виде напряжения. В состав схемы входят два импеданса – выходной импеданс датчика $Z_{\text{вых}}$ и входной импеданс интерфейса $Z_{\text{вх}}$. Выходной сигнал датчика представлен в виде источника напряжения U , соединенного последовательно с выходным импедансом. Для некоторых типов датчиков выходной сигнал удобнее представлять в виде источника тока, включенного параллельно с выходным импедансом датчика. Оба варианта идентичны. С учетом двух импедансов входное напряжение интерфейсной схемы можно представить в виде:

$$U_{\text{вх}} = U \frac{Z_{\text{вх}}}{Z_{\text{вх}} + Z_{\text{вых}}}.$$

Для каждого конкретного случая необходимо определять свою эквивалентную схему датчика. Это требуется для исследования частотных характеристик и фазовых задержек комбинации двух устройств – датчика и интерфейса. Например, емкостной детектор можно представить в виде конденсатора, соединенного параллельно входному импедансу интерфейса, а пьезоэлектрический датчик – в виде параллельного соединения резистора с очень большим сопротивлением и конденсатора небольшой емкости.

При разработке согласующих схем необходимо анализировать быстродействие их входных элементов. Обычно на входе интерфейсов стоят операционные усилители, имеющие ограниченную частотную полосу пропускания. Существуют программируемые операционные усилители с регулируемым током смещения, позволяющие управлять входными частотными характеристиками схемы. Чем больше ток, тем выше быстродействие.

На рис. 9 показана более подробная эквивалентная схема входных цепей пассивного (т. е. не генерирующего никаких сигналов возбуждения) интерфейса, состоящего из операционного усилителя или АЦП. Схема состоит из входного импеданса $Z_{вх}$ и нескольких генераторов, представляющих напряжения и токи, формируемые внутри схемы. Эти сигналы являются помехами (паразитными) и их необходимо компенсировать. Кроме того, они изменяют свои значения в зависимости от температуры. Напряжение U_0 – входное напряжение смещения. При коротко замкнутых входных выводах это напряжение соответствует величине постоянной составляющей сигнала на входе схемы. Последовательное подключение источника напряжения смещения к входу схемы, указывает на независимость этого источника погрешности от величины выходного импеданса датчика. Ток I_0 ток смещения. Для многих биполярных транзисторов его величина довольно значительна, для полевых транзисторов с управляемым $p-n$ переходом она гораздо ниже, для КМОП схем – совсем незначительна. Если в состав датчиков и интерфейсов входят компоненты, обладающие высоким импедансом, этот ток может привести к серьезным проблемам. При прохождении через входные цепи интерфейса и выходные цепи датчика он вызывает паразитное падение напряжения, которое будет тем выше, чем больше импеданс этих цепей. В отличие от напряжения смещения, ток смещения приводит к появлению ошибки, пропорциональной выходному импедансу датчика. Эта погрешность незначительна для датчиков с низким выходным сопротивлением. Так, например, индуктивные детекторы нечувствительны к изменениям величины тока смещения.

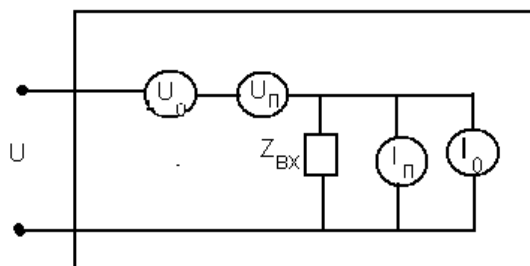


Рис. 9. Эквивалентная схема, учитывающая источники помех во входных цепях интерфейса

При работе с высокоимпедансными схемами к большим погрешностям может привести ток утечки, возникающий из-за низкого поверхностного сопротивления печатных плат. Источниками тока утечки могут

быть плохое качество материала плат, загрязнение поверхности плат, влага и пр. Путь тока утечки – через шину питания, сопротивление платы, выходной импеданс датчика (рис. 10)

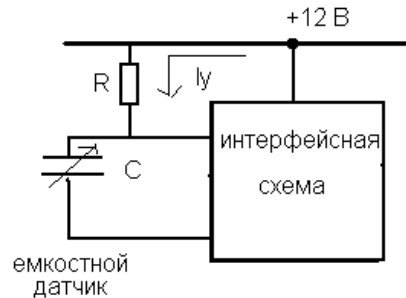


Рис.10. Ток утечки, возникающий на плате, приводит к изменениям характеристик входных цепей интерфейса

Если датчик имеет емкостную природу, ток утечки быстро заряжает его выходную емкость. Паразитный ток утечки не только приводит к появлению погрешности, но и может вывести датчик из строя. Существует несколько способов снижения тока утечки. Один из них – правильная разводка платы, при которой высоковольтные проводники отделены от высокоимпедансных компонентов схемы. На практике погрешностями, вызванными утечками по толщине многослойных плат, можно пренебречь. Другой способ – электрическая защита. Активное экранирование является эффективной защитой входных цепей. Для этого входные цепи окружаются проводящим экраном, подсоединенным к точке, потенциал которой равен потенциалу на входе интерфейса. Такая защита позволяет поглощать токи утечки, возникающие на разных участках платы, а также значительно уменьшать токи, способные достичь входных выводов. Иногда для более эффективной защиты с двух сторон печатной платы формируют активные экранирующие контуры.

Интерфейсные схемы, обладающие большим импедансом необходимо размещать как можно ближе к датчикам. Конечно, не всегда удастся избежать соединительных линий, однако в этих случаях лучше использовать в качестве соединительных коаксиальные кабели с хорошей изоляцией. Необходимо также учитывать, что наличие кабеля может сократить ширину полосы пропускания. Этого можно избежать, используя цепи обратной связи, компенсирующие влияние экранированного кабеля.

Подсоединение к интерфейсу (входу усилителя) любых компонентов, кроме датчиков, может стать причиной возникновения дополни-

тельных помех. Например, для подавления высокочастотных помех на вход интерфейса или в цепь обратной связи входных устройств включают фильтрующие конденсаторы. При этом необходимо учитывать, что многие конденсаторы, особенно керамические, обладают так называемым «эффектом памяти». Если такой конденсатор заряжается от датчика, либо блока питания, либо некоторого внешнего источника помех, для разряда ему может потребоваться время от нескольких секунд до нескольких часов. В процессе же разрядки он будет вести себя как источник напряжения (батарея), которое, складываясь с сигналом датчика, приводит к значительным погрешностям в результатах измерения. Необходимо поэтому либо избегать включения конденсаторов во входных цепях, либо, если это невозможно, использовать пленочные конденсаторы, эффект памяти в которых незначителен (практически отсутствует).

Усилители

Большинство пассивных датчиков обладают очень слабыми выходными сигналами, величина которых не превышает порой нескольких микровольт или пикоампер. В то же время, входные сигналы стандартных электронных устройств обработки данных (АЦП, частотные модуляторы и т. д.) должны быть порядка вольт или миллиампер. Поэтому для подключения датчиков к таким устройствам требуются промежуточные усилители с коэффициентами усиления до 10^4 по напряжению и до 10^6 по току. Обычно усилители являются одной из составных частей интерфейсных схем. Наибольшей популярностью сейчас пользуются усилители, построенные на основе операционных усилителей и пассивных дискретных компонентов, хотя существуют и стандартные схемы усиления, реализованные на дискретных компонентах – транзисторах, резисторах, конденсаторах и катушках индуктивности. Усилители могут также использоваться для согласования устройств по импедансу, для улучшения соотношения сигнал/шум, в качестве фильтров и пр.

Операционные усилители могут быть интегрированными (монолитными) и гибридными (состоящими как из монолитных, так и дискретных частей). В состав интегрированного усилителя входят сотни транзисторов, резисторов, конденсаторов. На основе операционных усилителей строятся специализированные интегральные схемы. Типовой операционный усилитель обладает, как правило, следующими характеристиками:

- Два входа (инвертирующий и неинвертирующий);
- Высокое входное (сотни Мом и до нескольких ГОм) и низкое выходное сопротивление (доли Ома);
- Способность работать с емкостной нагрузкой;

- Низкое входное напряжение смещения (несколько мВ или мкВ);
- Низкий входной ток смещения (от нескольких пА и менее);
- Высокий коэффициент усиления при разомкнутой цепи обратной связи ($10^4 \div 10^6$ и более);
- Высокий коэффициент ослабления синфазного сигнала (КОСС);
- Низкий коэффициент собственного шума;
- Широкий рабочий частотный диапазон;
- Низкая чувствительность к помехам по шине питания;
- Высокая стабильность характеристик при изменении параметров окружающей среды.

Глубина обратной связи операционного усилителя определяет такие параметры как линейность, стабильность коэффициента усиления, выходной импеданс, которые зависят в основном от характеристик компонентов обратной связи. Для получения высокой точности необходимо обеспечить выполнение правила: коэффициент усиления операционного усилителя без обратной связи должен быть в 100 раз больше коэффициента усиления операционного усилителя с обратной связью на самой высокой рабочей частоте. Для более высокой точности это отношение должно быть 1000 и больше.

Операционный усилитель усиливает не только полезные сигналы, но и шумы, т. е. паразитные напряжения и токи, попадающие на его входы. Поэтому необходимо на практике принимать во внимание указанные производителями технологические допуски на значения токов и напряжений смещения усилителей. Из-за напряжений и токов смещения выходной сигнал интерфейсной схемы при нулевом входном сигнале практически никогда не бывает равным нулю. В схемах, работающих с постоянными или медленно меняющимися сигналами, серьезной проблемой может быть отделение полезного сигнала от этих нежелательных компонентов. На практике величину напряжения смещения регулируют либо непосредственно на операционном усилителе, либо при помощи независимых внешних компенсационных цепей. Величина смещения тока и напряжения зависит от температуры. В схемах, где операционный усилитель работает с большим коэффициентом усиления, выходное напряжение смещения может служить источником серьезных погрешностей. Одним из способов решения этой проблемы является выбор операционного усилителя с низким значением тока и напряжения смещения, а также с высоким входным сопротивлением. Для эффективного снижения напряжения смещения применяются также усилители постоянного тока с модуляцией и демодуляцией сигнала.

Назначение повторителя напряжений – преобразование импеданса от высокого уровня к низкому. Повторитель, как правило, обладает высоким входным импедансом (высокое сопротивление и низкая емкость) и низким выходным сопротивлением. Хороший повторитель имеет близкий к единице коэффициент усиления по напряжению (около 0,999 на низких частотах) и высокий по току. Высокий входной и низкий выходной импеданс повторителей делает их незаменимыми элементами при согласовании датчиков с устройствами обработки сигналов.

Повторитель, подключенный к выходу датчика, практически не оказывает влияния на работу последующих цепей, поэтому его часто называют буферным устройством между датчиком и нагрузкой. При разработке повторителей, либо выборе устройства для измерительной системы, следует принимать внимание следующие правила:

- При подключении к датчикам с токовым выходом входной ток смещения повторителя должен быть как минимум в 100 раз меньше тока датчика;
- Входное напряжения смещения не должно превышать величину младшего значащего разряда, либо должно быть полностью скомпенсировано;
- Температурный коэффициент напряжения и тока смещения не должен приводить к появлению погрешности, превышающей величину младшего значащего разряда во всем температурном диапазоне.

Измерительный усилитель имеет два входа и один выход. В отличие от операционного усилителя он обладает конечным коэффициентом усиления (не более 100) и возможностью подключения источников сигнала одновременно на два входа, т. е. все компоненты цепи обратной связи подключаются не к инвертирующему и неинвертирующему входам, а к другим выводам измерительного усилителя. Основная функция измерительного усилителя – формирование выходного сигнала, пропорционального разности напряжений на его входах. Измерительные усилители могут быть реализованы на основе операционных усилителей по интегральной или гибридной технологиям. Важным свойством измерительного усилителя является высокое сопротивление по обоим входам, что позволяет ему работать как дифференциальный усилитель и эффективно подавлять синфазные аддитивные помехи. В настоящее время можно приобрести промышленные измерительные усилители в интегральном исполнении, но на практике часто применяют измерительные усилители, реализованные из дискретных компонентов. На рис. 11 приведена схема, наиболее часто используемая при построении измерительных усилителей.

Полный коэффициент усиления такого измерительного усилителя находят из выражения:

$$k = \left(1 + \frac{2R_1}{R_2}\right) \cdot \frac{R_4}{R_3}.$$

Величина КОСС зависит от того, насколько точно в такой схеме подобраны резисторы. Как правило, при использовании резисторов с точностью 1 % значение КОСС не превышает 100, а при использовании резисторов с точностью 0,1 % КОСС имеет на порядок большие значения.

При построении измерительного усилителя можно использовать и другие подходы. Например, реализовать его на двух одинаковых операционных усилителях и нескольких точных резисторах. Для обеспечения низких уровней шума и тока смещения необходимо использовать операционные усилители, входные каскады которых построены на полевых транзисторах. В случаях, когда высокая точность не требуется, а стоимость имеет решающее значение, можно использовать простой измерительный усилитель, построенный на одном операционном усилителе и двух резисторах.

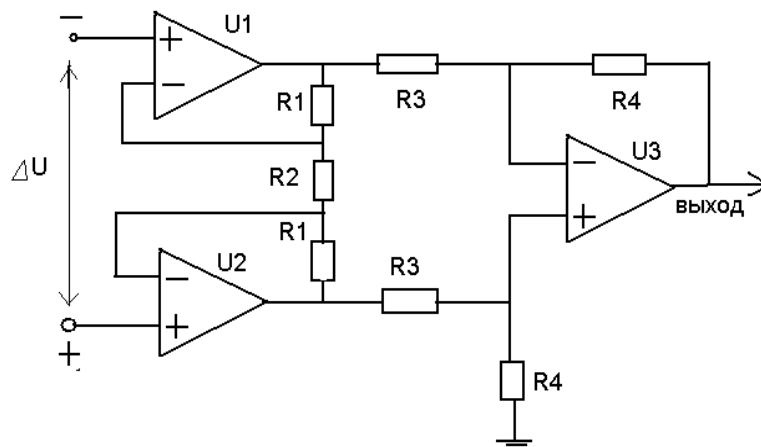


Рис. 11. Измерительный усилитель на трех операционных усилителях с точно подобранными резисторами

Характерной чертой *усилителей заряда* является очень низкий ток смещения. Такие усилители используются для преобразования в напряжение сигналов от емкостных датчиков, квантовых детекторов, пирозлектрических чувствительных элементов и других устройств, имеющих на выходе либо очень малые заряды (порядка пКл), либо очень маленькие токи (порядка пА). Поэтому усилители заряда являются преобразователями заряда (тока) в напряжение. На рис. 12 показана принципиальная схема преобразователя заряда ΔQ (а) и тока $I_{уст}$ (б) в напряжение. В

цепи обратной связи стоит конденсатор C , сопротивление утечки которого r должно быть намного больше его импеданса на самой низкой рабочей частоте. В усилителях заряда необходимо использовать только пленочные конденсаторы. Необходимо также принимать во внимание качество печатных плат и равномерность покрытия всех их компонентов.

Многие датчики могут быть представлены в виде конденсаторов. Часть емкостных датчиков, таких как микрофоны, емкостные датчики силы и давления, а также детекторы влажности, являются активными устройствами, т. е. для их работы требуется сигнал возбуждения. Другая часть емкостных датчиков являются пассивными устройствами, напрямую преобразующими внешнее воздействие в электрический заряд или ток. Примерами таких датчиков являются пьезо- и пирозлектрические преобразователи. Существуют также неемкостные датчики, которые можно рассматривать как генераторы тока (например, фотодиод).

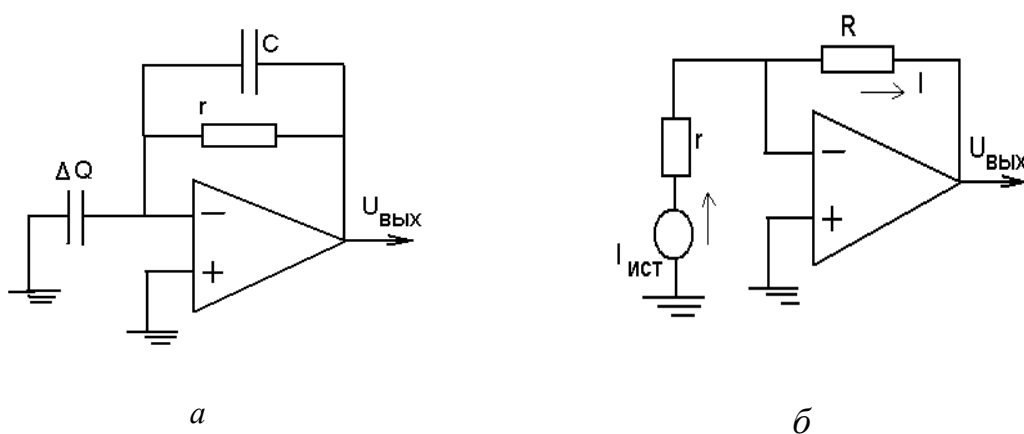


Рис. 12. Принципиальная схема усилителя заряда
 а – преобразователь заряда в напряжение;
 б – преобразователь тока в напряжение

Датчик с токовым выходом можно представить в виде сопротивления утечки, соединенного параллельно с генератором тока, обладающим бесконечно большим внутренним сопротивлением. Датчик вырабатывает ток I , который может течь через сопротивление внутри датчика (I_0) и через интерфейсную схему ($I_{\text{ВЫХ}}$). Ток I_0 является паразитным, поэтому следует стремиться к тому, чтобы сопротивление утечки датчика было намного больше входного импеданса интерфейса.

Схемы возбуждения

Активным датчикам для работы требуется дополнительная внешняя энергия. Примерами активных датчиков являются датчики температуры

(термисторы и резистивные детекторы температуры), датчики давления (пьезорезистивные и емкостные) и датчики перемещений (электромагнитные и оптические). Внешняя энергия может подаваться на датчики в различной форме: в виде постоянного тока или напряжения, в виде синусоидального или импульсного токов, в виде света или ионизационного излучения. Различные виды такой внешней энергии называются сигналами возбуждения. Часто стабильность и точность датчиков напрямую связана со стабильностью и точностью сигналов возбуждения, поэтому схемы возбуждения всегда должны выдавать сигналы, не приводящие к ухудшению характеристик всей измерительной системы.

Генераторы тока должны вырабатывать ток для подачи в цепи датчика, значение которого в заданных пределах не зависит ни от свойств чувствительного элемента, ни от величины внешнего сигнала, ни от факторов окружающей среды. Т. е. величина вырабатываемого тока не должна зависеть от импеданса нагрузки (амплитуда сигнала генератора должна оставаться постоянной даже при изменении импеданса нагрузки). При работе с датчиками необходимо, чтобы генератор тока не только вырабатывал сигнал, не зависящий от импеданса нагрузки, но и управляемый от внешнего источника сигналов (генератора сигналов специальной формы), имеющего, как правило, выходной сигнал в виде напряжения. Хороший тактовый генератор должен вырабатывать на выходе ток в строгом соответствии с управляющим сигналом, не зависящим от нагрузки при значительном изменении ее импеданса. Основными характеристиками генераторов тока являются выходное сопротивление и предельное напряжение. На практике выходное сопротивление должно быть как можно более высоким. Предельное напряжение – это максимальное напряжение на нагрузке, при котором не происходит изменения выходного тока. Современные источники тока, управляемые напряжением, часто строятся на операционных усилителях. Применяются однополярные (ток течет только в одну сторону) и биполярные генераторы тока. Последние подают на датчик ток возбуждения, который может менять свое направление. При использовании любого из возможных генераторов тока необходимо помнить о необходимости максимального снижения шумов в схеме для уменьшения погрешностей измерений.

Источник опорного напряжения – это устройство, вырабатывающее стабилизированное напряжение, на величину которого не влияют ни колебания сигнала блока питания, ни температурные изменения, ни нагрузка, ни старение, никакие другие факторы. Источники опорного напряжения выпускают и в интегральном исполнении, тем не менее, достаточно широко распространена практика использования простых

устройств – стабилитронов. При повышении напряжения внутри схемы падение напряжения на стабилитроне всегда остается постоянным при неизменном токе в цепи нагрузки. Во избежание перегрева и выхода стабилитрона из строя в его цепь обычно ставят токоограничивающие компоненты (резисторы, термисторы с положительным температурным коэффициентом и источники тока). Следует также учитывать температурную зависимость напряжения стабилизации – с увеличением температуры $p-n$ перехода стабилитрона его значение падает. В случаях, когда на выходное напряжение заданы строгие допуски, и оно должно оставаться постоянным при изменениях входного напряжения, тока в нагрузке и температуры, используются стабилитроны с температурной компенсацией (опорные стабилитроны). В настоящее время стабилитроны часто заменяют на устройства опорного напряжения на основе межзональных переходов. Как правило, они обладают более низким входным импедансом, чем низковольтные стабилитроны, а их рабочие напряжения стабилизации лежат в пределах $1,2 \div 10$ В.

Генераторы – устройства, вырабатывающие переменные электрические сигналы. Любой генератор состоит из усилительного блока, нелинейного элемента и цепи положительной обратной связи. Генераторы, в отличие от усилителей, являются нестабильными устройствами, чьи временные характеристики должны быть либо постоянными, либо изменяться в соответствии с заранее заданной функцией (такой генератор называется модулятором). В зависимости от используемых времязадающих компонентов, генераторы делятся на RC-генераторы (рабочая частота задается конденсаторами и резисторами), LC-генераторы (рабочая частота задается емкостными и индуктивными компонентами), кварцевые генераторы (рабочая частота задается механическим резонансом определенных срезов пьезоэлектрических кристаллов, обычно кварцевых или керамических). Генераторы включаются в состав многих датчиков, например, емкостных датчиков присутствия, используемых для обнаружения объектов (в частности, людей) в зоне действия антенны.

Задающие устройства – устройства, вырабатывающие напряжение, не зависящее от величины выходного тока в широком интервале рабочих частот и при разных нагрузках. При подсоединении к чисто резистивной нагрузке функция задающего устройства заключается в обеспечении датчиков необходимым током, в случае же реактивной нагрузки, включающей емкостные и индуктивные элементы, схемы задающих устройств усложняются. Однако даже когда датчик является чисто резистивным, при его подключении к другим устройствам в системе появляются паразитные емкостные компоненты, что происходит, например, ес-

ли подсоединение выполняется длинными проводами или коаксиальными кабелями. Величина этой емкости влияет на быстродействие и стабильность всей системы в целом.

Вносимый шум

Стабильность работы датчика и интерфейсной схемы зависит от их защищенности от шумов внешних источников. На рис. 13 показана схема распространения вносимых шумов. Источники вносимых шумов часто поддаются идентификации. Например, всплески напряжения на линиях питания, изменения окружающей температуры, солнечная активность и т. д. Такие помехи при попадании в датчики и интерфейсные схемы сказываются на их выходных сигналах. При этом они влияют либо на чувствительные элементы датчиков, либо на их выводы, либо на электронные компоненты в схеме. Для интерференционных сигналов датчик и интерфейсная схема играют роль принимающих устройств. Вносимые шумы можно классифицировать по нескольким критериям: способу попадания в датчик или интерфейс, типу влияния на выходной сигнал и пр. По тому, как вносимые шумы влияют на выходные сигналы, их можно разделить на аддитивные и мультипликативные.

<u>Источники шума</u> Сетевые помехи Магнитные, электростатические и электромагнитные поля Колебания температур Силы гравитации Ускорения и вибрации Влажность Ионизирующее излучение Химические вещества	<u>Способы распространения</u> Емкостная связь Магнитные поля Провода Монтаж	<u>Приемные устройства</u> Чувствительные элементы Резисторы Конденсаторы Предусилители
--	---	--

Рис. 13. Источники вносимых шумов и способы их распространения

Аддитивный шум $U_{ш}$ складывается с полезным сигналом U_n , формируя выходной сигнал $U_{вых}$:

$$U_{вых} = U_n + U_{ш}.$$

Величина аддитивного шума не меняется при изменении полезного сигнала (если сигнал равен нулю, на выходе датчика будет только шум).

Мультипликативный шум меняет передаточную функцию датчика и нелинейных компонентов таким образом, что полезный шум оказывается модулированным шумом:

$$U_{вых} = [1 + N(t)] \cdot U_n,$$

где $N(t)$ – функция шума от времени. Когда полезный сигнал равен нулю, мультипликативная помеха на выходе датчика равна нулю. Мультипликативный шум растет одновременно с увеличением полезного сигнала.

Для повышения помехозащищенности от вносимых аддитивных шумов датчики объединяют парами таким образом, чтобы их выходные сигналы вычитались один из другого. Такой способ называется дифференциальным методом построения датчиков. Один из датчиков, называемый основным, подвергается воздействию измеряемого сигнала, в то время как другой, эталонный датчик, защищается от его влияния (рис. 14). Такая комбинация датчиков называется двойным или дифференциальным датчиком. Насколько хорошо подавляются аддитивные шумы можно судить по величине коэффициента ослабления синфазного сигнала (КОСС):

$$КОСС = 0,5 \frac{S_1 + S_0}{S_1 - S_0},$$

где S_1 и S_0 – выходные сигналы основного и эталонного датчиков. КОСС зависит от величины внешних воздействий, и обычно чем выше входные сигналы, тем меньше его значение. Этот коэффициент является мерой симметричности датчика. Для эффективного подавления шумов оба датчика необходимо располагать как можно ближе друг к другу, они должны быть абсолютно идентичными и работать в одинаковых условиях. Также необходимо обеспечить надежное экранирование эталонных датчиков от внешних воздействий, иначе эффективность дифференциального метода значительно снижается.

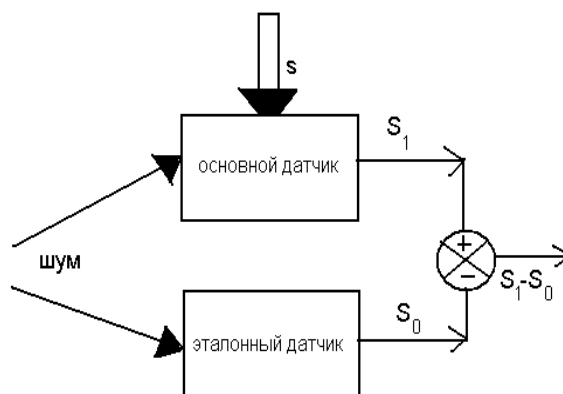


Рис. 14. Дифференциальный метод снижения аддитивных помех

Для уменьшения вносимого мультипликативного шума применяется метод измерения отношений, который был описан ранее.

Оба эти метода подавления шума абсолютно неприменимы при борьбе с собственными шумами, генерируемыми внутри датчиков и интерфейсных схем. Собственные шумы, как правило, подчиняются закону распределения Гаусса, чего нельзя сказать о вносимых помехах, которые часто невозможно описать статистическими методами. Вносимые шумы могут быть периодическими, нерегулярно повторяющимися, просто случайными. Обычно их удается существенно снизить, применяя методы борьбы с электростатическими и электромагнитными наводками от источников питания, радиостанций, механических ключей, а также всплесками напряжения и токов, возникающими из-за процессов переключений в реактивных цепях. К таким методам относятся фильтрация, развязка электрических цепей, экранирование проводников и компонентов, применение ограждающих потенциалов, исключение паразитных контуров заземления, установка гасящих диодов параллельно катушкам реле и моторов, выбор как можно более низких импедансов и использование малощумящих источников питания и опорного напряжения. Чаще всего электрические помехи попадают в схемы через паразитные емкости, существующие практически везде. Например, человек, стоящий на диэлектрическом покрытии, и земля формируют емкость порядка 700 пФ. Поскольку некоторые датчики и почти все электронные схемы имеют в своем составе нелинейные компоненты, высокочастотные наведенные сигналы могут оказаться выпрямленными и появиться на выходе системы в виде постоянного или медленно меняющегося напряжения.

Помехи, вызванные электрическими полями, могут быть значительно уменьшены при помощи соответствующего экранирования датчика и интерфейсных схем, особенно их нелинейных и импедансных компонентов. Существует несколько практических правил, которые рекомендуется соблюдать при экранировании схем:

- Электростатический экран должен быть подсоединен к внутренней точке защищаемой схемы, имеющей определенный опорный потенциал. Если один из выводов датчика подсоединен к земле, экран также должен быть заземлен. Если ни один из выводов датчика не подключен к точке заземления, заземлять экран бесполезно.
- При использовании экранированных проводов их экранировка должна быть подсоединена к точке с опорным потенциалом только со стороны источника сигнала.
- Количество независимых экранов, используемых в системе сбора данных, должно быть равно числу измеряемых сигналов. Экраны разных

линий не должны контактировать друг с другом, если только они не используют общий опорный потенциал.

- Экран следует заземлять только в одной точке, желательно рядом с датчиком.

- Для уменьшения индуктивности подсоединение экрана к земле надо вести короткими проводами. Это особенно важно при одновременной передаче аналоговых и цифровых сигналов.

Защита от магнитных полей – гораздо более трудная задача, чем защита от электростатических и электрических полей, поскольку магнитные поля проникают внутрь проводящих материалов. Для построения эффективных магнитных экранов на низких частотах необходимо использовать материалы, обладающие высоким коэффициентом магнитной проницаемости, а на высоких – из толстой стали. Приемные устройства надо располагать как можно дальше от источников магнитных полей, провода следует размещать перпендикулярно силовым линиям магнитных полей, для передачи больших токов следует применять провода типа «витая пара». Существует еще целый ряд других правил и рекомендаций по защите от магнитных полей [4].

Вибрации, вызванные ускорениями, также являются источниками внешних помех в датчиках, поэтому желательно защищаться от них. Помехи этого типа могут менять передаточные характеристики системы (мультипликативный шум) или приводить к появлению паразитных наводок в цепях датчика (аддитивный шум). Если в состав датчика входят механические компоненты, вибрации, совершаемые вдоль определенных направлений с заданной частотой, могут привести к возникновению резонансных явлений. Т. е., для некоторых датчиков ускорение является источником помех. Например, пьезоэлектрические детекторы также обладают некоторыми пьезорезистивными свойствами. И хотя основным назначением этих датчиков является измерение перепадов температуры, они реагируют и на резкое изменение таких свойств окружающей среды как атмосферное давление, ветер или механические вибрации. Иногда реакции на эти посторонние воздействия настолько сильны, что их трудно отличить от полезного сигнала.

Цифро-аналоговые преобразователи

Передача информации от цифровых частей электронных схем к аналоговым осуществляется с помощью цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП). Здесь величина, заданная двоичным или двоично-десятичным числом, преобразуется в пропорциональный уровень тока или напряжения.

При разработке интегральных ЦАП наибольшие трудности представляет реализация высокоточных резисторов с сильно различающимися сопротивлениями. Поэтому задание весовых коэффициентов ступеней часто осуществляется посредством последовательного деления напряжения с помощью резистивной матрицы. В таких ЦАП точность определения токов сильно зависит от падения напряжения на ключах. От этого недостатка свободны преобразователи на переключателях тока. В них выходное напряжение пропорционально входному числу. Принцип токовых переключателей используется преимущественно в ЦАП, реализуемых по биполярной технологии (например, К594ПА1). В быстродействующих ЦАП токовые переключатели реализуются на стандартных элементах эмиттерно-связанной логики (например, К1118ПА1).

Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) преобразуют входное напряжение в пропорциональное ему число. Выделяют три метода преобразования: параллельный, поразрядного взвешивания и последовательного счета.

Наиболее популярными являются АЦП, построенные на принципе последовательного приближения, т. к. они дают возможность найти хороший компромисс между быстродействием и точностью. В параллельном методе входное напряжение одновременно сравнивают с N опорными напряжениями и точно определяют, между какими двумя уровнями оно находится. При этом результат получают в один шаг.

В методе поразрядного взвешивания входное напряжение преобразуется в n -разрядное двоичное число за n шагов.

Метод последовательного счета самый медленный. Результат получается за N шагов, где N – число минимальных ступенек, укладывающихся в преобразуемое напряжение. Имеются различные схемы решения этого метода, которые часто также называются методами.

По построению АЦП бывают разных типов – из дискретных компонентов, в виде ИС, высокопроизводительных гибридных схем, модулей или блоков. АЦП также изготавливают в виде стандартных ячеек для применения в специализированных ИС. Основными характеристиками АЦП являются: абсолютная и относительная погрешность, линейность, разрешающая способность, скорость преобразования, стабильность, способность не пропускать коды и стоимость. Довольно часто, особенно когда стоимость АЦП имеет решающее значение, применяют преобразователи, реализованные на дискретных компонентах и в виде монолитных ИС.

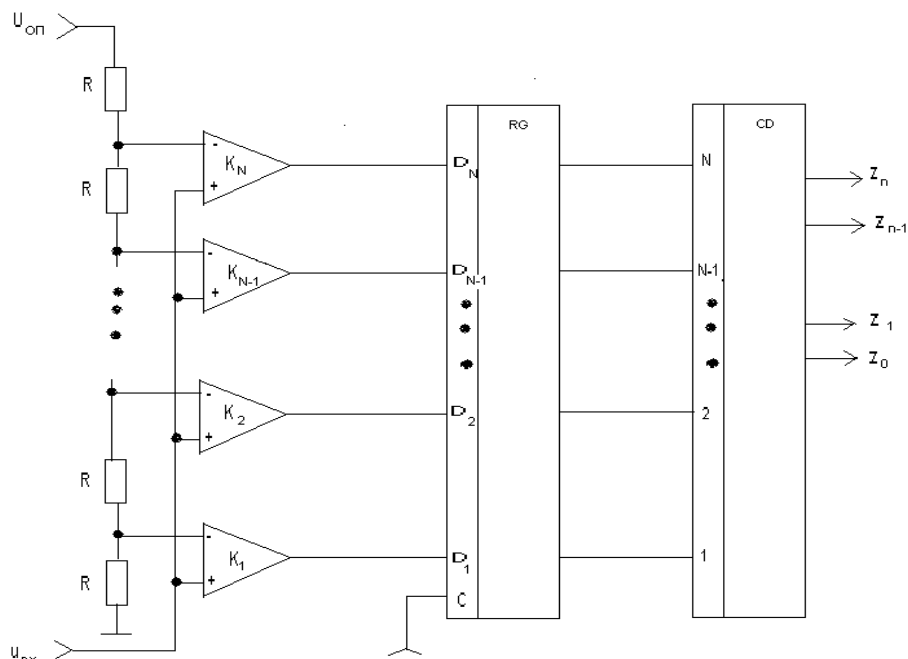


Рис. 15. АЦП параллельного кодирования

АЦП параллельного кодирования содержит N компараторов ($k_0, k_1, \dots, k_n$), опорные входы которых подключены к делителю напряжения, задающему пороги срабатывания компараторов. Входное напряжение постоянно сравнивается с опорными напряжениями компараторов. При этом все компараторы, пороги срабатывания которых находятся ниже уровня входного напряжения, имеют активное состояние. Акт преобразования фиксируется стробирующим импульсом (С), по которому состояния компараторов заносятся в регистр. Выходной двоичный код формируется шифратором (CD). Пример такого АЦП – интегральная схема К1107ПВ1, представляющая собой 6-разрядный АЦП параллельного действия. Она содержит 63 компаратора, шифратор и буферный регистр. Результат преобразования может быть представлен в прямом двоичном, обратном двоичном, прямом с дополнением до двух и обратном с дополнением до двух кодах. Время преобразования не превышает 0,1 мкс.

Метод поразрядного взвешивания (последовательного приближения) получил наибольшее распространение, поскольку он обеспечивает высокое разрешение при большой скорости преобразования. В основе этого метода лежит сравнение выходного напряжения $U(z)$ внутреннего ЦАП с входным напряжением $U_{ВХ}$. Результатом каждого сравнения является установление значения очередного разряда в регистре АЦП. Выработка n -разрядного двоичного слова занимает n фиксированных интервалов времени (тактов).

Метод последовательного счета реализуется в нескольких вариантах. Например, следящий АЦП состоит из реверсивного счетчика, ЦАП, ком-

паратора, генератора тактовых импульсов и схемы управления реверсом счетчика. Входное напряжение $U_{вх}$ непрерывно сравнивается с выходным напряжением ЦАП $U(z)$. Если $U_{вх} > U(z)$, счетчик работает в режиме сложения, тогда значение $U(z)$ приближается к значению входного напряжения. Когда $U(z)$ становится больше входного напряжения, счетчик переключается на вычитание, т. е. на счетчике устанавливается число, эквивалентное входному напряжению. Младший разряд реверсивного счетчика постоянно флуктуирует, поэтому его можно не использовать при считывании выходного кода. АЦП такого типа обладают высоким быстродействием (их пропускная способность может составлять до 1 МГц) и хорошей разрешающей способностью (до 16 разрядов). Они выпускаются в виде ИС и широко используются во многих типах датчиков. Их время преобразования постоянно и не зависит от входного сигнала. Все преобразования уникальны, поскольку внутренние логические схемы и регистры обнуляются после каждого из них, что делает АЦП последовательного счета пригодными для многоканального мультиплексирования. Важным условием для получения достоверных данных с помощью такого АЦП является то, что входной сигнал не должен меняться в течение всего цикла преобразований, иначе могут возникать ошибки. Для обеспечения постоянства входного напряжения в состав АЦП последовательного счета, как правило, входит схема выборки и хранения, являющаяся аналоговым устройством, запоминающим входной сигнал в начале цикла и хранящим его значение до окончания всех преобразований.



Рис. 16. Следящий АЦП

Когда не требуется высокая скорость преобразований, часто применяются интегрирующие АЦП и преобразователи напряжения в частоту. Интегрирующие АЦП не содержат ЦАП. Существует несколько разновидностей интегрирующих преобразователей. Все они основаны на пилообразном изменении выходного напряжения интегратора $U_{\text{инт}}$ под воздействием соответствующих сигналов. Наиболее известным интегрирующим преобразователем является АЦП с двойным интегрированием (см. рис 17). Примером такого типа преобразователя является АЦП двойного интегрирования К572ПВ2.

АЦП двойного интегрирования являются очень популярными преобразователями. Они используются практически во всех цифровых вольтметрах и других портативных устройствах, не требующих высокого быстродействия. АЦП данного типа выполняют косвенное преобразование входного напряжения – сначала они преобразуют $U_{\text{вх}}$ в функцию времени, а затем при помощи счетчика импульсов конвертируют в цифровой код. Хотя АЦП двойного интегрирования являются довольно медленными преобразователями, но благодаря своей простоте, невысокой стоимости, помехоустойчивости и сравнительно высокой разрешающей способности они часто применяются в случаях, где нет быстрых изменений внешних сигналов.

АЦП двойного интегрирования состоят из интегратора и компаратора (рис. 17). Пороговое напряжение интегратора устанавливается равным нулю (соответствующий вывод заземляется), либо некоторому постоянному напряжению. К интегратору ключом Кл1 поочередно подключается то входное, то опорное напряжение. Когда входное напряжение интегратора пересекает нулевой уровень, компаратор срабатывает и посылает сигнал в логический блок, управляющий переключателями Кл1 и Кл2. Последний используется для разряда интегрирующего конденсатора C . В начале преобразований (на вход «старт» приходит разрешающий сигнал) ключ Кл1 подает на интегратор входное напряжение, блок управления запускает таймер, установленный на фиксированный интервал времени T , в течение которого напряжение на выходе интегратора линейно возрастает. Любые изменения входного сигнала в процессе интегрирования усредняются. По истечении времени T напряжение на выходе интегратора становится равным $U = \bar{U}_{\text{вх}} (T/RC)$, где $\bar{U}$ – среднее значение входного сигнала за время T . В этот момент ключ Кл1 подключает на вход интегратора эталонное напряжение, полярность которого противоположна входному сигналу. Наступает фаза интегрирования эталонного напряжения, во время которой счетчик считает импульсы, поступающие от тактирующего устройства. Счет прекращается в момент, когда

напряжение интегратора становится равным нулю. По сигналу компаратора, фиксирующего переход нулевого уровня, блок управления переключает Кл2, разряжающий конденсатор C . Заряд на конденсаторе, полученный в течение интегрирования входного сигнала, точно равен заряду, потерянный за время интегрирования эталонного напряжения, поэтому несложно показать, что $\bar{U}_{\text{вх}} / \bar{U}_{\text{оп}} = \Delta t / T$. Следовательно, отношение среднего входного напряжения к эталонному можно заменить на отношение двух временных интервалов. Далее счетчик выполняет процедуру конвертирования временного интервала Δt в цифровой код, определяя количество тактовых импульсов, поступающих в течение данного промежутка времени, которое и будет соответствовать среднему входному напряжению. При этом $U_{\text{оп}}$ и T должны быть постоянными величинами.

Иногда для уменьшения погрешностей, вносимых аналоговой частью схемы (интегратором и компаратором), вводят еще одну стадию преобразований, во время которой конденсатор заряжается сигналом дрейфа нуля. Для компенсации этого явления полученное при этом значение напряжения вычитается при интегрировании входного сигнала. Существует еще один способ уменьшения статической погрешности, заключающийся в запоминании результатов счета, полученных на стадии заряда конденсатора сигналом дрейфа нуля, с последующим вычитанием цифровыми методами.

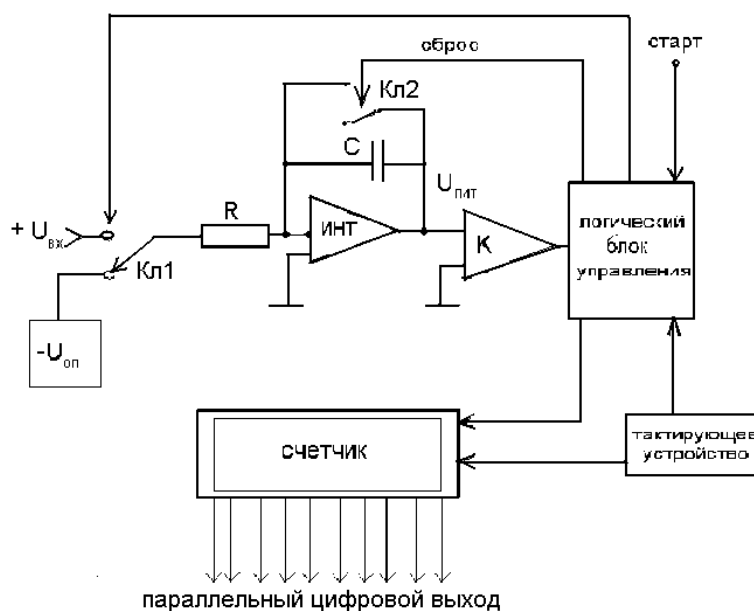


Рис. 17. Схема интегрирующего АЦП

АЦП двойного интегрирования имеют следующие преимущества:

- Подавляют шумы с частотой $1/T$. Так, например, при $T = 200$ мс подавляются 50-ти и 60-тигерцевые помехи, что защищает АЦП от сетевых наводок;
- Точность преобразования в таких АЦП не зависит от стабильности тактовой частоты, т. к. одно и то же тактирующее устройство задает интервал счета T и вырабатывает счетные импульсы;
- Разрешающая способность преобразователей ограничивается только их разрядностью, поэтому для представления сигнала иногда используется большее количество разрядов, чем это требуется для обеспечения заданного уровня точности;
- Интегрирование входного напряжения обеспечивает подавление высокочастотных помех и усреднение всех выбросов сигнала в течение заданного интервала T ;
- Пропускная способность АЦП двойного интегрирования ограничивается величиной, равной $1/2T$ преобразований в секунду.

АЦП двойного интегрирования часто дополняют аналоговыми компонентами (операционными усилителями, ключами, резисторами и конденсаторами) и микроконтроллером, управляющим тактирующим устройством, логическим блоком и счетчиком. Иногда аналоговая часть такого АЦП выполняется в виде отдельной ИС.

Особым видом высокоточных АЦП можно считать ИС, генерирующие на своем выходе последовательность импульсов с частотой, пропорциональной входному аналоговому сигналу (току или напряжению). Эти ИС часто называют преобразователями «напряжение-частота» (ПНЧ). Например, выпускается ПНЧ К1108ПП1, который преобразует положительные и отрицательные уровни напряжения ± 10 В в импульсы прямоугольной формы с калиброванной длительностью. ИС можно применить также для преобразования частоты в напряжение (ПЧН).

Достоинством ПНЧ является высокая разрешающая способность преобразований, поэтому они часто используются с датчиками, обладающими большим временем интегрирования (от нескольких секунд до нескольких лет), в преобразователях цифрового значения в частоту (в ЦАП), в частотных модуляторах, делителях и умножителях. На основе ПНЧ реализуются самые простые и экономичные АЦП. Время, требуемое на преобразование напряжения в цифровое значение, определяется максимальной частотой ПНЧ и необходимым уровнем разрешения. Как правило, ПНЧ обладают сравнительно невысоким быстродействием по сравнению с АЦП последовательного приближения, однако они подходят для совместной работы с большинством датчиков. Когда ПНЧ ис-

пользуется в качестве АЦП, он подключается к счетчику, тактируемому с заданной частотой отсчетов. Например, если верхний предел частоты преобразователя равен 32 кГц, а счетчик включается 8 раз в секунду, максимальное количество импульсов, посчитанных за один счетный период, составит 4000, что соответствует разрешающей способности 12-разрядного АЦП. Используя ПНЧ и счетчик можно также получить устройство, необходимое при проведении измерений внешних сигналов в определенном интервале времени. В этом случае счетчик подсчитывает количество импульсов в течение заданного промежутка времени, а не среднее число импульсов за цикл счета.

Другое полезное свойство ПНЧ – простота передачи импульсов по линиям связи. Импульсные сигналы обладают большей помехоустойчивостью по сравнению с аналоговыми сигналами, имеющими высокое разрешение. Существует несколько типов ПНЧ. Самые популярные из них построены на основе мультивибратора и схемы с уравниванием заряда. Достоинства схемы на мультивибраторе – простота и относительно низкая потребляемая мощность. В то же время она обладает низким подавлением высокочастотных шумов, поэтому в случаях, когда требуется высокая помехоустойчивость, предпочтительнее применять схемы с уравниванием заряда. В состав ПНЧ с уравниванием заряда входит аналоговый интегратор и компаратор напряжений. Достоинства этой схемы – высокое быстродействие, линейность и хорошее шумоподавление. Такие схемы выпускаются и в интегральном исполнении (например, ADVFC32 и AD650 фирмы Analog Devices).

Основным достоинствам преобразователей интегрирующего типа, кроме всего вышесказанного, является их способность подавления аддитивных шумов, т.к. при выполнении процедуры интегрирования уровень помех значительно снижается. Счетчик выполняет подсчет импульсов от преобразователя в течение заданного промежутка времени T и ведет себя как фильтр с передаточной функцией вида $H(f) = \frac{\sin \pi \nu T}{\pi \nu T}$, где ν – частота импульсов.

На низких частотах значение этой передаточной функции близко к единице, т. е. преобразователь совместно со счетчиком выполняют корректные измерения. Однако на частоте $1/T$ передаточная функция равна 0, что означает полное подавление сигналов этих частот. Например, при интервале счета $T = 20$ мс, соответствующем частоте 50 Гц (частоте напряжения сети, которая часто является источником существенных помех во многих датчиках), пятидесятигерцовые шумы будут полностью устранены. Кроме того, импульсы с частотами, кратными 50 Гц, также будут подавляться.

В типовой системе сбора данных в состав ИС микроконтроллера часто входит АЦП, разрешающая способность которого ограничивается, как правило, 8-ю или 10-ю разрядами. При более высоком разрешении, когда число разрядов достигает 12 или 14, стоимость устройства резко возрастает. На практике для большинства задач 8–10 разрядов бывает достаточно для корректного преобразования внешних воздействий. Существуют два метода улучшения разрешающей способности системы: использование АЦП двойного интегрирования (его разрешающая способность ограничивается только скоростью счета и быстродействием компаратора), и применение АЦП совместно с устройством расширения разрешающей способности, дающим возможность повысить разрешение на несколько разрядов (например, с 8 до 12). На рис. 18 приведена принципиальная схема такого устройства. В ее состав включены ЦАП, мультиплексор и усилитель с коэффициентом усиления k . Несмотря на то, что теоретически такая схема дает возможность повысить разрешение до 16 разрядов, на практике получить такое высокое разрешение не удастся. Это связано с внутренними погрешностями ЦАП, дрейфом усилителя, шумами и пр. Однако этот метод дает возможность реально повысить разрешение до 10 или 12 разрядов.

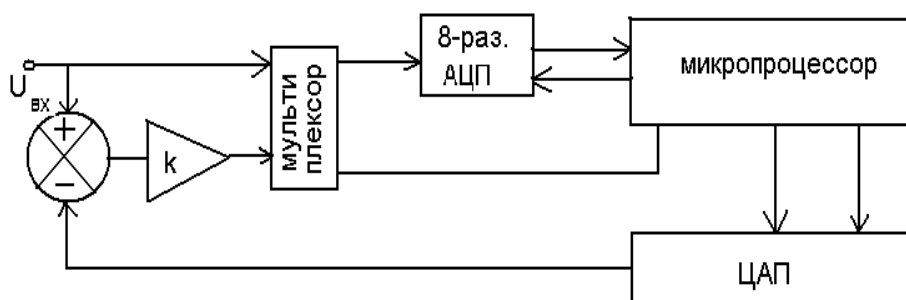


Рис. 18. Схема АЦП с улучшенной разрешающей способностью

Выходные сигналы датчиков, как правило, очень малы. Для приведения таких сигналов до уровня, совместимого с устройствами сбора данных, обычно применяются усилители. Однако зачастую наличие в системе усилителей и подводящих кабелей ведет к появлению дополнительных погрешностей, а также увеличению стоимости и сложности всей системы. Поэтому для некоторых типов датчиков использование усилителей является не лучшим способом согласования уровней сигналов. Во многих современных промышленных интерфейсных системах применяются цифровые устройства передачи и преобразования данных, реализо-

ванные на основе методов *прямой дискретизации выходных сигналов датчиков*, особенно эффективных в случаях интеграции датчика и всей системы на одном кристалле.

Традиционные методы аналого-цифровых преобразований основываются на работе с достаточно высокими входными сигналами (минимальный уровень младшего значащего разряда не менее 100–200 мкВ), что позволяет минимизировать погрешности, вызванные шумами и сигналами смещения. Однако это делает невозможным прямое подключение многих датчиков (в частности, термопарных или пьезорезистивных), поскольку их выходные сигналы не превышают часто нескольких милливольт (т. е. минимальный уровень младшего значащего разряда должен быть не более 1 мкВ при 10-ти разрядном АЦП). При прямой дискретизации выходных сигналов датчиков нет необходимости использовать усилители в интерфейсной схеме, что может привести к улучшению рабочих параметров системы без ухудшения точностных характеристик. Основная идея прямой дискретизации заключается во встраивании датчика в схему преобразователя сигнала (например, АЦП). Такие преобразователи являются нелинейными устройствами, в состав которых входит часто пороговый компаратор. Смещение порогового уровня компаратора приводит к модуляции выходного сигнала, что и используется для преобразования сигнала датчика в дискретный вид.

Измерение отношений сигналов является хорошим способом улучшения точности датчиков. Однако он работает, только если источники погрешностей имеют мультипликативную, а не аддитивную природу. Т. е., этот способ не поможет снизить тепловой шум, однако уменьшит влияние таких факторов как нестабильности источников питания, температуры, влажности, давления, старения и пр. Метод измерения отношений требует наличия в системе двух датчиков, один из которых является измеряющим внешнее воздействие, другой – компенсационным, который либо экранируется от измеряемых сигналов, либо не реагирует на них. Таким образом, природа датчиков не обязательно должна быть одинаковой, они лишь должны одинаково реагировать на внешние факторы, т. е. их рабочие характеристики в зависимости от влияния внешних факторов должны изменяться одинаково. На вход второго датчика (так наз. эталонного) подается известный сигнал, обладающий долговременной стабильностью и постоянством. Оба резистора подключаются к операционному усилителю через аналоговый мультиплексор. Выходной сигнал такой системы зависит только от отношения сигналов (либо параметров) измерительного и эталонного датчиков.

Мостовые схемы

Мостовая схема Уитстона является самой популярной схемой, используемой для измерения отношений. Принципиальная схема моста приведена на рис. 19. Сопротивления (импедансы) Z могут быть как активными (для резисторов $Z = R$), так и пассивными (емкостными $Z = (2\pi\nu C)^{-1}$ или индуктивными $Z = 2\pi\nu L$). Выходное напряжение такого моста определяется отношением:

$$U_{\text{вых}} = \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3 + Z_4} \right) \cdot U_{\text{вх}}$$

Мост считается сбалансированным при выполнении условия:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}$$

Выходное напряжение сбалансированного моста равно нулю. При изменении импеданса в любом плече моста он выходит из состояния равновесия и, в зависимости от знака этого изменения, на выходе моста появляется положительное либо отрицательное напряжение. На практике, как правило, переменным является только один импеданс моста. Этим импедансом часто является датчик. Резистивные мостовые схемы часто используются при работе со струнными датчиками, пьезорезистивными преобразователями давления, термисторами и другими датчиками, где необходимо компенсировать влияние факторов окружающей среды. Такие устройства также применяют при работе с магнитными и емкостными датчиками, измеряющими давление, влажность, перемещение и пр.

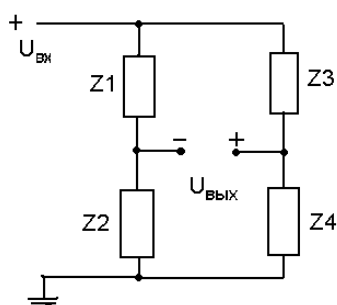


Рис. 19. Принципиальная схема моста Уитстона

Схема Уитстона часто работает в режиме несбалансированного моста. При включении в одно из плеч такого моста датчика получим измерительную схему на принципе рассогласования (рис. 20а), заключаю-

щийся в определении напряжения в диагонали моста. Другой метод использования мостовой схемы – метод нуль-балансировки. Для корректной работы в этом режиме мостовая схема в любой момент времени должна находиться в сбалансированном состоянии. Для выполнения условия балансировки моста импеданс плеча моста, соседнего с плечом, в котором расположен датчик, должен изменяться так же, как и импеданс датчика (принцип построения такой схемы см. на рис. 20б).

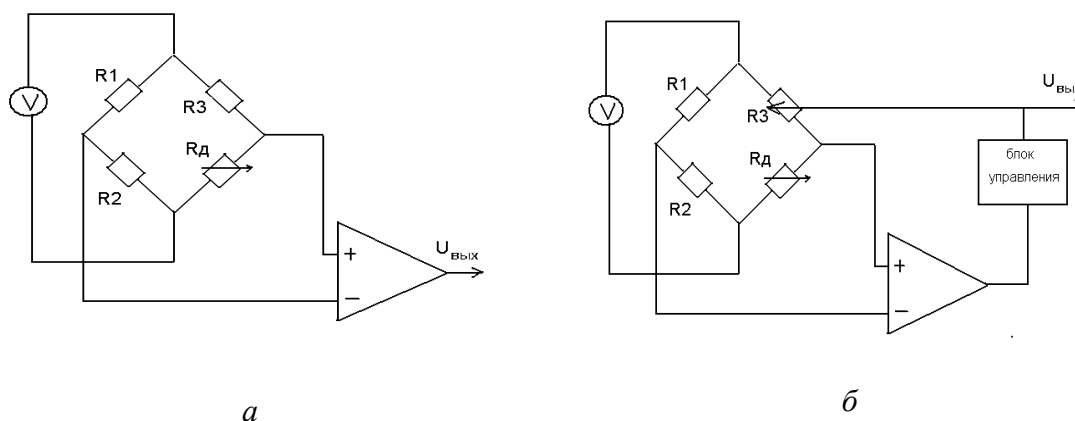


Рис.20. а – неуравновешенный мост,
б – уравновешенный мост, управляемый обратной связью

Резистивный мост Уитстона часто применяется при измерении температуры, силы, давления, магнитных полей и пр. В большинстве случаев используемые резисторы обладают температурной чувствительностью, что приводит к изменению передаточной функции датчика. Для большинства датчиков, кроме, очевидно, датчиков температуры, температурная зависимость является нежелательным эффектом, который необходимо компенсировать. Одним из способов компенсации является подключение к устройства, выходной сигнал которого зависит от изменения температуры. Этот сигнал в дальнейшем используется при аппаратной либо программной корректировке показаний датчика. Другой способ – встроить такое устройство в саму мостовую схему. Блок температурной компенсации в мостовых схемах может быть реализован различными способами. Например, при помощи термистора с отрицательным температурным коэффициентом, постоянного резистора, источника напряжения, управляемого температурой, источника тока. Подробнее об этих способах можно узнать в [2]. Каждый метод температурной компенсации имеет свои границы применения, в каждом конкретном случае необходимо учитывать ряд факторов – температурный диапазон, допустимую температурную погрешность, окружающие условия, размеры, стоимость

и пр. Универсального решения этой проблемы не существует. Выбор способа компенсации – это всегда компромисс между различными техническими ограничениями.

Передача данных

Сигнал от датчика может передаваться в устройство обработки данных либо в цифровом, либо в аналоговом виде. На практике чаще всего используется цифровая передача данных, для выполнения чего датчик необходимо совмещать с АЦП. Цифровая передача данных имеет ряд преимуществ перед аналоговой, самым главным из которых является высокая помехоустойчивость. Однако цифровые методы передачи данных могут использоваться не всегда. В зависимости от типа соединений аналоговые способы передачи данных могут быть разделены на двух- и четырехпроводные.

Двухпроводная передача используется для сопряжения датчиков с управляющими и регистрирующими устройствами в промышленных системах управления технологическими процессами. По двухпроводной линии можно передавать как напряжение, так и ток (в качестве промышленного стандарта выбран ток в пределах $4 \div 20$ мА).

В ситуации, когда, например, резистивный датчик необходимо подключить к удаленной интерфейсной схеме, при этом датчик обладает относительно низким сопротивлением (например, сопротивление пьезорезисторов обычно составляет порядка 100 Ом), сопротивление соединительных проводов может привести к серьезным проблемам, поскольку оно влияет на напряжение возбуждения, поданное на мостовую схему. Решить эту проблему можно, применив четырехпроводной метод подключения датчика. Это позволяет измерять сопротивление удаленного резистора без учета сопротивления соединительных проводов. Этот метод передачи данных является удобным средством измерения сопротивления удаленных датчиков, часто применяется в промышленных автоматических системах управления технологическими процессами и в научных исследованиях.

Шумы в датчиках и интерфейсных схемах

Шумы в датчиках и интерфейсных схемах могут быть источниками серьезных погрешностей, что необходимо учитывать при разработке схем. Можно выделить две основные группы шумов – собственные шумы (все шумы, возникающие внутри схемы) и вносимые шумы (интерференционные помехи), источники которых находятся вне схемы. Ни один датчик, как хорошо он бы ни был спроектирован, не вырабатывает на выходе сигнал, который бы точно соответствовал внешнему воздей-

ствию. Чтобы определить, насколько хорошо выходной сигнал датчика воспроизводит входной сигнал, пользуются критериями требуемой точности и надежности. Отклонения сигналов датчиков от истинного значения могут быть систематическими и случайными. Первый тип зависит от вида передаточной функции датчика, его линейности, динамических и других характеристик. Общим для всех типов систематических отклонений является то, что они определяются конструкцией датчика, производственными допусками, качеством материалов, калибровкой и пр. Все эти характеристики в течение длительного времени должны оставаться постоянными, либо изменяться очень медленно. Они поддаются математическому описанию и могут быть определены экспериментально. Во многих случаях значение систематических погрешностей приводится в справочных данных или в технической документации на устройство (датчик). Часто именно случайные погрешности называются шумами. Под шумом понимаются все помехи, привносимые либо внешними воздействиями и факторами окружающей среды, либо возникающие в компонентах датчиков и схем в диапазоне от нуля до максимальных рабочих частот.

Сигнал датчика, преобразуемый в интерфейсной схеме, состоящей из усилителя и АЦП, в цифровой код, нельзя характеризовать только его амплитудой и спектральными параметрами. Всегда необходимо учитывать его разрешающую способность. И в случаях, когда требуется высокая разрешающая способность преобразований, необходимо учитывать все источники шума. В таких системах шумы могут вырабатываться операционными усилителями, а также другими компонентами, используемыми как в цепях обратных связей, так и в цепях смещения и других. Одна из причин возникновения шума – дискретная природа электрического тока. Движение электронов может быть описано при помощи статистических терминов, оно зависит от температуры. Следовательно и мощность шума, возникающего вследствие движения электронов, также определяется температурой. В резисторах это тепловое движение электронов приводит к появлению теплового шума (в зарубежной литературе его также называют шумом Джонсона). Среднеквадратичное значение напряжения этого шума можно определить из выражения

$$\overline{U_{ш}}^2 = 4kTR\Delta\nu,$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура в Кельвинах, R – сопротивление в Омах, $\Delta\nu$ – ширина полосы, в пределах которой проводились измерения, в Герцах. Даже самый обыкновенный резистор является ис-

точником шума (ведет себя как постоянно работающий генератор электрических сигналов). Чем меньше величина сопротивления резисторов, тем больший тепловой шум они производят. Величина теплового шума является практически постоянной в широкой полосе частот, поэтому его называют *белым шумом*. Другой разновидностью белого шума является шум Шотки, возникновение которого объясняется протеканием электрического тока в полупроводниковых $p-n$ переходах. Величина этого шума зависит от значения величины тока, протекающего через $p-n$ переход, и полосы частот измерений. На низких частотах к этим шумам добавляются шумы, связанные с протеканием переменного тока. В обоих источниках шума – и тока (шум Шотки) и напряжения (тепловой шум) – спектральная плотность шума обратно пропорциональна частоте. Наибольший шум соответствует самой низкой частоте. Такой шум называют розовым. Он характерен для всех проводящих материалов, следовательно, также возникает и в резисторах. На самых низких частотах практически невозможно отделить белый шум от розового. Особенно розовый шум ощутим на частотах ниже 100 Гц, где работает большинство датчиков. Поэтому в этом частотном диапазоне он может стать основным источником погрешностей, преобладая над шумом Шотки и тепловым. Величина розового шума зависит от тока, протекающего через материал. В случаях, когда требуется получить на низких частотах низкий уровень шума, в датчиках или входных цепях интерфейсных схем рекомендуется использовать пленочные или проволочные резисторы, особенно при протекании через них больших токов, для снижения уровня розового шума. Напряжение результирующего шума от всех источников тока и напряжений в схеме определяется по формуле:

$$u = \sqrt{u_{u1}^2 + u_{u2}^2 + \dots + (R_1 i_{u1})^2 + (R_2 i_{u2})^2 + \dots}$$

Величина случайной погрешности при этом равна среднеквадратичному значению шума:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt},$$

где T – время наблюдения, u – напряжение шума, t – текущее время.