

Введение научного редактора перевода

Коллектив авторов книги, посвященной интеллектуальным сенсорным системам, в первых же строках текста утверждает, что направление технического развития человеческого социума, которое называется «сенсоризация» составляет содержание третьей промышленной революции, и на основе результатов двух первых — механизации и информатизации, как полагают авторы, — по их прогнозам должна завершиться полной автоматизацией и роботизацией. Диалектический подход авторов к обсуждаемой проблеме «сенсоризация» следует признать естественным в силу ее новизны и поэтому можно понять их стремление определить место нового направления в цивилизационных путях развития человечества.

Историческое место такого нового направления развития техники, как «сенсоризация», вероятно, надо искать не на уровне промышленных революций, а в пределах диалектического развития электроники. И это подтверждается всем дальнейшим содержанием книги, ибо обсуждаются, практически, только электронные структуры. Различные физические эффекты, тем или иным образом, сводятся к электронным сигналам. Таким образом, справедливо будет полагать, что «сенсоризация» или «сенсорика» являются новым направлением развития электроники. Разумеется, электроника занимает достойное место в определенной части второй и третьей промышленных революций.

Вместе с перспективой развития электроники в границах перманентного эволюционного процесса появилась новая ветвь электроники, связанная с пограничными физическими, химическими и биологическими явлениями относительно электронных процессов. Возникшие в качестве самостоятельных отдельных направлений, такие, как оптоэлектроника, магнитоэлектроника, акустоэлектроника, криоэлектроника, хемотроника, биоэлектроника вскоре обнаружили некоторую общность, которая состояла в том, что для любого направления существенно необходим пограничный элемент, преобразующий сигналы одной из физических, химической или биологической областей в электронную. Такой элемент стали называть сенсором или первичным чувствительным элементом (ПЧЭ), новое направление развития электроники получило название «сенсорика».

Интенсивный прогресс этого направления и значительные накопления научных и практических результатов в области сенсорики привели, в частности, к факту появления представляемой технической общественности русского перевода книги «Интеллектуальные сенсорные системы» (Smart Sensor Systems). Авторами обобщен большой опыт научной и практической деятельности по проектированию и производству различных видов сенсоров и сенсорных систем.

Рассмотрено многообразие сенсоров, ориентированных на восприятие различных свойств окружающей среды, а также свойств материалов и состояний машин и механизмов. Показаны возможные промышленные технологии изготовления сенсоров. С точки зрения конструктивной реализации предлагаются прогрессивные методы проектирования, получившие названия «система на кристалле» и «система в корпусе», которые позволяют использовать для целей оптимального интегрирования необходимых функций как монотехнологии, так и композиции разнородных технологий. На основании значительного опыта и, учитывая междисциплинарность и относительную открытость сенсорных подсистем, в противовес декомпозиционно-

композиционным методам проектирования авторы рекомендуют объектно-ориентированное проектирование, которое позволяет избежать избыточного числа итераций и, тем самым, сократить продолжительность создания системы.

Большое внимание уделяется таким параметрам сенсоров, как точность, скорость измерений, устойчивость к различным паразитным и перекрестным влияниям сигналов, в том числе фликкерного шума ($1/f$) и шума квантования, а также совместимости компоновки сенсоров и их интерфейсов. Рассматривая различные структуры чувствительных элементов, авторы приводят примеры разработки таких МЭМС-структур, как кантилеверы, плавающие и закрытые мембраны, МЭМС-акселерометр с газовой сейсмической массой. В качестве интеллектуальных функций сенсоров авторы предлагают автокалибровку, стабилизацию температуры подложки сенсора, управление кратковременной и длительной стабильностью сенсора, динамическое усиление, динамическое деление и другие динамические технологии обработки сигнала.

На основе достаточно большого разнообразия рассмотренных сенсоров показывается инвариантность решения одной и той же задачи, так измерение температуры возможно производить резистивным сенсором, термопарой, полупроводниковым сенсором, МЭМС-структурами и др. Описанные преимущества и ограничения каждого вида сенсора позволяют при проектировании систем принимать решения близкие к оптимальным.

Следует отметить, что после каждого тематического раздела книги авторы производят обобщения, которые позволяют читателю получить концентрированное представление о рассмотренном материале, а после этого формулируются перспективные тенденции развития обсуждаемого направления. Именно такая последовательность создает логическую доказательную базу, убеждающую в правомерной научно-технической позиции авторов.

Практическая направленность книги, в чем следует усматривать ее особую ценность, состоит в том, что в конце каждой главы, посвященной либо одному из видов сенсоров, либо сенсорных интерфейсов, либо сенсорной измерительной технике авторы предлагают практические задачи, содержание которых позволяет закрепить изложенный теоретический материал. И далее, в завершающем разделе книги приводится решение этих задач, так что имеется реальная возможность проверки уровня освоения предлагаемых методов и технологий проектирования интеллектуальных сенсоров и сенсорных систем на их основе.

Вместе с тем, может быть именно в силу новизны сенсорного направления и не устоявшейся терминологии, в настоящей книге авторы определяют сенсоры, как преобразователи сигналов различной энергетической природы в электрические. Конечно, энергетическая характеристика первичного сигнала может достаточно универсально описать свойства среды, но иногда эту энергетику будет весьма сложно проявить в практической реализации сенсорного устройства. Например, как определить энергетику такой характеристики среды, как влажность? Далее, интеллектуальность сенсора определяется тем, что к собственно сенсору добавляется аналоговая интерфейсная схема, аналого-цифровой преобразователь и интерфейс шины, т.е. содержательно весь интеллект сенсора заключается в том, что свойства среды представляются в цифровом виде. И, наконец, в книге имеется разд. 1.2.4 «Определение интегральных интеллектуальных сенсорных систем», но в двух абзацах этого раздела деклари-

рованного определения не приводится. При такой неопределенности исходных положений читателю будет достаточно сложно воспринимать последующий текст.

В отечественной научно-технической литературе направлению электроники, которое обозначено термином «сенсоризация», соответствует с некоторыми допущениями, понятие «микросистемотехника» (МСТ). С целью максимальной детерминированности места этого направления в диалектической спирали развития электроники приведем его возможно строгое определение, поскольку термин «микросистемотехника» и определяемое им понятие сегодня нельзя считать окончательно установившимися,

Итак, **микросистемотехника** — это комплексное технологическое направление электроники, использующее первичные чувствительные элементы (ПЧЭ) в микроэлектронном исполнении, позволяющие получить информацию о физических, химических, биологических свойствах среды в электронном виде для последующего направленного управления средой или исполнительными приборами и механизмами.

МСТ, безусловно, можно считать новой ветвью развития электроники, которая, с одной стороны, опирается на технологические результаты предыдущих этапов (микроэлектроника, физика пограничных эффектов), а, с другой стороны, использует инновационные возможности нанотехнологий. Последнее обстоятельство позволяет рассчитывать на определенный оптимизм в отношении перспектив развития электроники в пределах современного диалектического витка, основанного на эффекте переноса носителей заряда в твердом теле.

Технологическое направление микросистемотехники предполагает создание и производство **изделий микросистемотехники**. Под такими изделиями мы понимаем устройства, получаемые совокупностью научно-технических и технологических способов формирования в объеме и (или) на поверхности твердого тела упорядоченной композиции микронных и субмикронных областей с заданными составом, структурой и геометрией. Эти изделия должны реализовывать функции восприятия, преобразования информации из обобщенной физической (либо химической, биологической) формы в электрическую, а также функций хранения, обработки (используя эффекты, отличные от традиционной транзисторной электроники), трансляции информации, энергии и движения, а затем выработки управляющих воздействий в требуемых режимах и условиях эксплуатации.

В такой постановке целевой функции изделия микросистемотехники становится очевидным его интеллектуальность в силу направленного заранее запрограммированного инвариантного управления свойствами среды или контролируемого объекта.

Развитие инновационного направления микросистемотехники неизбежно приводит к очередной технологической модернизации электронной отрасли, которая потребует значительных ресурсов для решения следующих задач:

- проектирования изделий МСТ на основе программных и аппаратных средств нового поколения;
- создания наноструктурированных материалов;
- производства изделий МСТ на основе технологического и метрологического оборудования нового поколения;
- формирования и завоевания рынков сбыта систем на основе изделий МСТ.

В порядке реализации задачи ускоренного развития отечественной электроники предприятиями радиоэлектронной отрасли страны достигнуты значитель-

ные успехи в создании следующих базовых технологий (БТ) и конструкций изделий МСТ и приборов на их основе:

- микроэлектромеханических (МЭМС) датчиков ускорения и давления, позволяющих реализовать широкий спектр приборов, в том числе для блоков ориентации малых космических аппаратов, ультразвуковых счетчиков газа;
- микросистем анализа магнитных полей, позволяющих создавать приборы для научных исследований, машиностроения и медицины;
- формирования сверхпроводниковых структур туннельного типа для построения современных квантовых эталонов напряжения, приемо-преобразовательных систем субмиллиметрового диапазона длин волн и элементной базы квантовых компьютеров на основе Q-битовой логики;
- матриц микрозеркал для модуляции оптического излучения;
- микроэлектромеханических переключателей и коммутаторов для комплексной миниатюризации специальной аппаратуры;
- производства полупроводниковых газовых сенсоров на основе композитных и мембранных структур, обеспечивающих создание газовых течеискателей и пороговых газоанализаторов, применяемых в промышленности и ЖКХ;
- производство сенсоров, использующих эффект поверхностных акустических волн (ПАВ) и на их основе создание систем радиочастотной идентификации (РЧИД) с уникальными ранее недостижимыми характеристиками по условиям эксплуатации, долговечности и устойчивости к информационному взлому;
- твердотельных гироскопов вибрационного типа на основе пьезоэффекта, позволяющих реализовать устройства управления подвижными объектами в экстремальных условиях;
- микроакустоэлектромеханических датчиков давления жидких и газообразных сред широкого спектра применений;
- параметрического ряда кантилеверов для прецизионных измерений, позволяющих создавать современные атомно-силовые микроскопы.

Во всех этих работах в полном объеме используются схмотехнические, конструктивные и технологические принципы, которые в совокупности составляют инновационное направление развития электроники — микросистемотехнику.

Издаваемая на русском языке книга, обобщающая опыт проектирования интеллектуальных сенсорных систем (в отечественной терминологии — изделий микросистемотехники) коллектива Дельфтского технического университета (Нидерланды) и сотрудников компаний: Sentron AG, Sentronics AD, Senis GmbH, Ametes AG, Bradford Engineering B. V., Landis & Gyr AG, Delft Instruments Company, Nissan Motor Company, Smartec B. V., Xensor Integration B. V., безусловно, будет весьма полезной разработчикам отечественной радиоэлектронной аппаратуры.

Научный редактор перевода выражает признательность к.т.н., доц. И.М. Лазеру за плодотворные обсуждения спорных позиций зарубежных коллег, сопоставительный ретроспективный анализ результатов развития электроники с целью отработки научно обоснованных перспективных решений. Редактор благодарен директору книгоиздательских программ РИЦ «ТЕХНОСФЕРА» С.А. Орлову за содержательное методическое сопровождение издания книги, которое способствовало повышению качества издания.

Научный редактор перевода, д.т.н., проф. В.А. Шубарев

Предисловие

Благодаря весьма интенсивным усилиям большого числа ученых и инженеров технология сенсоров достигла стадии отрочества. Теперь можно ожидать, что начнется устойчивый период роста интеллектуального и технологического потенциала сенсорных систем, который, в конечном итоге, приведет к стадии зрелости. Достаточно трудно прогнозировать, когда завершится этот процесс развития, и что собой будет представлять его последняя стадия. В краткосрочной перспективе ожидается прогресс автономных сенсоров, интегрированных в распределенные системы с интеллектуальными сигнальными процессорами и интеллектуальным регулированием исполнительных механизмов при минимальном потреблении энергии. В долгосрочной перспективе сенсорные системы можно представить в виде составляющей части роботов со свойственной животному или человеку системой архитектуры.

Само собой разумеется, эти идеи не новы. Вполне уместен вопрос, почему понадобилось так много времени, чтобы реализовать подобные разработки. Трудно перейти на другой уровень технологического развития? Может быть, внедрение нанотехнологий, позволяющее организовать структуру технического объекта на атомарном уровне, откроет новые перспективы, к которым мы стремимся?

Никто этого точно не знает, но очевидно, что одна из основных причин «вялотекущего» прогресса технологии сенсоров связана с междисциплинарным характером данной области знаний, предполагающим необходимость тесного сотрудничества физиков, химиков, инженеров-электриков и инженеров-механиков, экспертов в области информационных технологий. Кроме того, следует взаимодействовать с медицинскими работниками, агрономами, садоводами и экономистами.

Эта книга представляет собой справочное пособие для проектировщиков и пользователей сенсоров и сенсорных систем. Написана на основе материала, изложенного в междисциплинарном курсе «Интеллектуальные сенсорные системы», организованном Дельфтским техническим университетом в 1995 г. Цель курса — представление базовых принципов современных сенсорных систем для широкого круга специалистов в различных областях знаний, разработка общего языка и научных основ для обсуждения проблем и развития взаимного сотрудничества. Таким образом, мы надеемся внести свой вклад в непрерывный процесс расширения во всем мире аудитории, участвующей в подобных возбуждающих живой интерес разработках.

Во время написания этой книги многие люди оказали нам помощь и внесли свой посильный вклад в ее издание. Мы высоко ценим поддержку в подготовке данной книги со стороны руководства факультетов прикладных и академических институтов. Большую помощь нам оказали предложения, сделанные нашими рецензентами: доктором Фэрри Н. Тот (Exalon Corp.), доктором Михаэлем Пертиджс (National Semiconductors), исследователем Джероеном ван Меером (Xensor Integration), профессором Альбертом Дж. П. Тьювиссенем (TUDelft), доктором Андре Бошем (TUDelft), исследователем Ки Джиа (TUDelft) и всеми авторами, которые также выступали в качестве рецензентов.

В отношении нашего издателя, John Wiley & Sons Ltd., мы хотели бы выразить слова признательности менеджеру проекта Никки Скиннеру за техническую редакцию рукописи, выпускающему редактору Симоне Тейлор за поддержку и помощь в организации договоров. Также хотелось бы отметить миссис Труди Хаувелинг (TUDelft) за оказание секретарской помощи в ходе работы, а также Р. Джанс за выполнение рисунков для издания. Мы также признательны Сарре Фон Галамбос за ее превосходный английский язык и лингвистические исправления. Кроме того, мы хотели бы выразить благодарность университетам, исследовательским институтам и компаниям, которые разрешили нам написать эту книгу и помогли с иллюстративными материалами, что позволило сделать книгу более привлекательной для нашего читателя.

Фирменный сайт по книге: www.wiley.com/go/meijer_smart.

*Джерард К. М. Мейджер
Дельфт, Нидерланды*

Об авторах

Джерард К. М. Мейджер

Джерард К. М. Мейджер родился в Ватерингене, Нидерланды, в 1945 г. Степень магистра и доктора философии в области электротехники получил в Дельфтском техническом университете (Дельфт, Нидерланды) в 1972 и 1982 г., соответственно. С 1972 г. член исследовательского и преподавательского состава Дельфтского технического университета, где в качестве профессора преподает курс аналоговой электроники и электронной измерительной аппаратуры. В 1984 г. и по совместительству в период с 1985 по 1987 г. Дж. К. М. Мейджер временно командирован в компанию Delft Instruments Company (Дельфт, Нидерланды), где принимает участие в разработке промышленных датчиков и преобразователей температуры. В 1996 г. в качестве одного из учредителей создает фирму SensArt, в которой работает консультантом в области конструирования и разработки сенсорных систем. В 1999 г. Датский технологический фонд STW присудил Дж. К. М. Мейджеру почетную степень «Simon Stevin Meester». В 2001 г. включен в состав профессуры Антони ван Левенгука Дельфтского технического университета. Дж. К. М. Мейджер является председателем Национальной платформы STW в области сенсорных технологий и директором ежегодно проводимого Europractice курса «Интеллектуальные сенсорные системы».

Пэдди Дж. Френч

Пэдди Дж. Френч получил степень бакалавра в области математики и степень магистра в области электроники в Университете Саутгемптона (Великобритания) в 1981 и 1982 г., соответственно. В 1986 г. в этом же университете защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора философии в области исследования пьезорезистивного эффекта в поликристаллическом кремнии. После работы в течение 18 месяцев в Дельфтском техническом университете и защиты диссертации (Нидерланды) в 1988 г. направляется в Японию. В течение трех лет работает над сенсорами для автомобилей в Центральной инжиниринговой лаборатории компании Nissan Motor Company. В мае 1991 г. возвращается в Дельфтский технический университет, где принимает участие в исследовании механической микрообработки и оптимизации процессов производства сенсоров. С 2002 г. возглавляет лабораторию электронной измерительной аппаратуры. В 1999 г. включен в состав профессуры Антони ван Левенгука. Ему также присвоена почетная степень «Simon Stevin Meester» Датского технологического фонда.

Зандер (А.В.) ван Херваарден

Зандер (А.В.) ван Херваарден родился в 1957 г. в Роттердаме (Нидерланды). В 1982 г. получил степень бакалавра в области экономики в Университете Эразмуса в Роттердаме. В 1983 г. ему присваивается степень магистра, а в 1987 г. — степень доктора философии в Дельфтском техническом университете. В обоих случаях в области тепловых сенсоров. В 1988 г. в качестве одного из учредителей создает компанию Xensor

Integration. С этого времени он исполнительный директор компании. Основные направления его деятельности — тепловые сенсоры и кремниевые микроструктуры.

Йохан Х. Хюиджисинг

Йохан Х. Хюиджисинг родился в Бандунге (Индонезия) 21 мая 1938 г. В 1969 г. получил степень магистра в области электротехники в Дельфтском техническом университете (Дельфт, Нидерланды), а в 1981 г. в этом же университете — степень доктора философии за работу в области операционных усилителей. С 1969 г. — член исследовательского и преподавательского состава лаборатории электронной измерительной аппаратуры департамента электротехники Дельфтского технического университета, где с 1990 г. работает в качестве профессора, а с 2003 г. — в качестве заслуженного профессора в области электронной измерительной аппаратуры. Читает курс по технике электрических измерений, электронной измерительной аппаратуре, операционным усилителям и аналого-цифровым преобразователям. Область исследований — конструирование аналоговых схем (операционные усилители, аналоговые умножители и др.), а также интегральные интеллектуальные сенсоры. Является членом Института инженеров по электротехнике и электронике (IEEE). Датский технологический фонд присвоил ему почетную степень «Simon Stevin Meester».

Рачо М. Иванов

Рачо М. Иванов родился в деревне Разлив (Болгария) 25 декабря 1945 г. Степень магистра и доктора философии в области электронной техники получил в Техническом университете Софии (Болгария) в 1969 и 1980 гг., соответственно. С 1970 по 1977 гг. интенсивно работает над микропроцессорными системами в Токийском технологическом институте (Япония). С 1970 г. работает в Техническом университете Софии. В настоящее время — профессор; специализируется на преподавании, конструировании, разработке и применении встроенных систем, промышленных систем на основе микроконтроллеров и микропроцессоров, а также интеллектуальных сенсорных систем.

Павел Кеджик

Павел Кеджик родился в Чешской Республике в 1971 г. Университетский диплом и степень доктора философии получил в Чешском техническом университете в Праге в 1994 и 1999 гг., соответственно. В 1999 г. поступает в Институт микроэлектроники и микросистем Федеральной политехнической школы Лозанны для работы по проектированию и испытанию схем. Область исследований: феррозондовый магнитометр, микросенсоры Холла, проектирование цифроаналоговых ИС, а также малошумящей схемотехники промышленного применения.

Худжин Ли

Худжин Ли родился в 1963 г. в г. Тианджине (Китай). Степень бакалавра в области физики и магистра в электротехнике получил в Нанкайском университете (Тиан-

джин, Китай) в 1983 и 1986 гг., соответственно. В 1997 г. получил степень доктора философии на факультете электротехники Дельфтского технического университета (Нидерланды). С сентября 1996 г. по совместительству работает в качестве старшего научного сотрудника на факультете электротехники, математики и вычислительной техники Дельфтского технического университета, где занимается вопросами исследования и разработки интеллектуальных емкостных сенсоров и низкочастотных интерфейсов для интеллектуальных сенсоров. Начиная с 1997 г., работает по совместительству на фирме Smartec B. V., где занимается вопросами создания интеллектуальных температурных сенсоров и интеллектуальных сенсорных интерфейсов. В 2002 г. поступает на работу в компанию Bradford Engineering B.V. (Хеерле, Нидерланды), где выполняет НИОКР в области инструментария для космической промышленности.

Радивое С. Попович

Радивое С. Попович получил диплом инженера по специальности инженерная физика Белградского университета (Югославия) в 1969 г., степень магистра и доктора наук в области электроники в университете Ниш (Югославия) в 1974 и 1978 гг. С 1969 по 1981 г. работает в компании Elektronska Industrija (Ниш, Югославия); с 1982 по 1993 г. — в компании Landis & Gyr AG, в центральном исследовательском бюро (Цуг, Швейцария). С 1994 г. профессор в Федеральной политехнической школе Лозанны (Швейцария). Область исследований: сенсоры оптических и магнитных сигналов, электронные схемы сопряжения, шумовые эффекты. Доктор Р. С. Попович — автор или соавтор около 250 публикаций и 100 патентов. Является учредителем стартап компаний: Sentron AG, Sentronics AD, Senis GmbH, Ametes AG. Член Швейцарской и Сербской академий инженерных наук.

Михаэль Дж. Веллекууп

Михаэль Дж. Веллекууп родился в Амстердаме в 1960 г. В 1982 г. получил степень бакалавра в области физики, в 1994 г. — степень доктора философии. В 1988 г. вместе с партнерами основал компанию Xensor Integration B.V., где был исполнительным директором до 1996 г. В этом же году он создает новую группу по исследованию в области физических хемосенсоров в лаборатории электронных измерительных приборов DIMES Дельфтского технического университета. В 1997 г. — доцент этого университета. С 2001 г. — профессор в области промышленных сенсорных систем Института сенсоров и исполнительных систем в Венском технологическом университете. В 2002 г. — руководитель этого института. С 2005 г. — член-корреспондент Австрийской академии наук. В этом же году получает награду общества Eurosensors.

Сергей Ю. Юриш

Сергей Ю. Юриш родился в Германии в 1963 г. Степень магистра в области автоматики и телеметрии получил в 1985 г. во Львовском государственном политехническом университете. С тех пор активно занимается разработкой микропроцес-

сорных и виртуально измеряющих инструментальных средств. В 1997 г. в этом же университете ему присуждается степень доктора философии в области измерительных приборов. В 1996 г. поступает в Институт компьютерных технологий для участия в различных международных проектах в области интеллектуальных сенсоров; возглавляет департамент по НИОКР. С 2006 г. — профессор Технического университета Каталонии (UPC-Barcelona). Профессор С. Ю. — Юриш обладатель девяти патентов, автор более 130 статей и публикаций, четырех книг. Основатель и президент Международной ассоциации частотных датчиков (IFSA), а также редактор журнала «Сенсоры и Преобразователи» (Sensors & Transducers).

Райнольд Ф. Вольфенбуттель

Райнольд Ф. Вольфенбуттель получил степень магистра в 1984 г., а степень доктора философии — в 1988 г. в Дельфтском техническом университете. С 1986 г. — член исследовательского и преподавательского состава Дельфтского технического университета, доцент департамента микроэлектроники. Принимает участие в исследовании средств измерений и самих процессов измерения, в работах по функциональной интеграции микроэлектронных схем и кремниевых сенсоров внутри ИС, в решении задач производственной совместимости, в том числе, микрообработки в кремнии и микросистемах. Внештатный научный сотрудник университетов в Мичигане, Энн-Арбор (США) в 1992, 1999, 2001 гг., университетов Тохоку и Сендай (Япония) в 1995 г., Федеральной политехнической школы Лозанны (Швейцария) в 1997 г., ему присуждена награда NOW pioneer (1997). Председатель Национальной конференции по сенсорам в 1996 г., конференций Eurosensors в 1999 г. и Micromechanics Europe в 2003 г.

ГЛАВА I

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ: ПОЧЕМУ? ГДЕ? КАК?

Йохан Х. Хюиджисинг

1.1. Третья промышленная революция

Автоматизация включает три стадии:

1. Механизацию.
2. Информатизацию.
3. Сенсоризацию.

Человечество всегда стремилось расширить свои возможности (рис. 1.1). Сначала это выражалось в наращивании механической мощи: изобретены паровой двигатель и двигатель внутреннего сгорания, электрический мотор и реактивный двигатель. Механизация полностью изменила общество. Так состоялась первая промышленная революция.

Затем человечество развило свой интеллектуальный потенциал: изобретены средства искусственной логики и коммуникации — компьютер и интернет. Стадия информатизации снова меняет общество и когда она завершится, прогнозировать достаточно сложно.

Тем не менее, это далеко еще не все. Создав сенсоры, человечество учится искусственно расширять их чувствительные возможности. Сенсоризация в сочетании с механизацией и информатизацией завершит третью промышленную революцию полной автоматизацией или роботизацией.

Показательный пример — автоматизированная система контроля полета современного самолета (рис. 1.2). Она включает множество сенсоров для мониторинга процесса. Компьютеры выдают сигналы, сравнивают их с заданными значениями и передают регулирующие сигналы на двигатели, рули и заслонки, которые приводят самолет в движение. Тройственная взаимосвязь механики, компьютеров и сенсоров обеспечивает полет самолета на автопилоте.

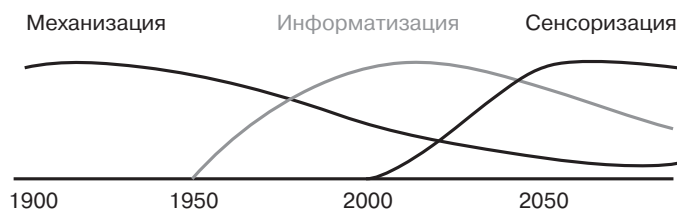


Рис. 1.1. Сенсоризация: третья революция автоматизации

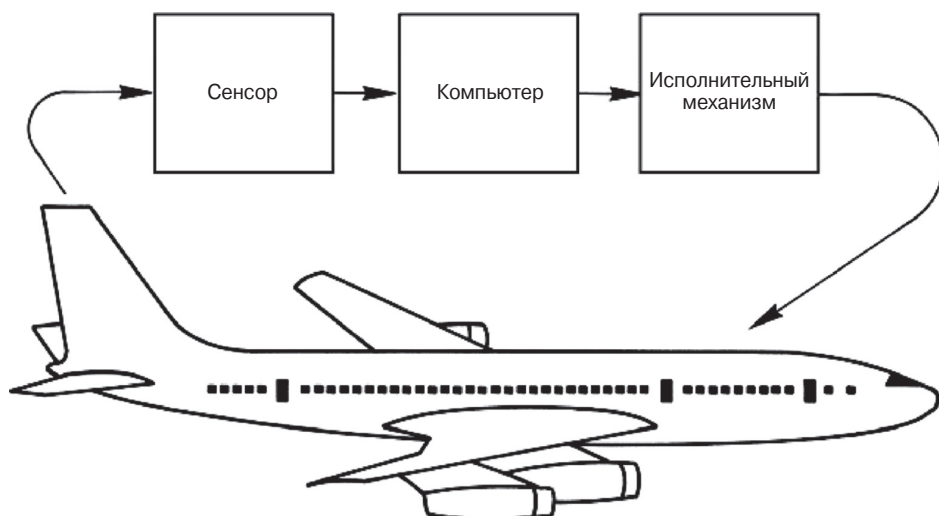


Рис. 1.2. Полностью автоматизированный самолет: тройственная связь между механизацией, информатизацией и сенсоризацией

Если самолет может лететь в автоматическом режиме, почему до сих пор мы не можем заставить наши автомобили везти нас на работу, просто сообщив им об этом? Потому что сенсорная система для водителя автомобиля слишком тяжелая, громоздкая и дорогая в производстве. Поэтому, прежде чем применять сенсорные системы в умных автомобилях, умных домах и производственных машинах, необходимо уменьшить их стоимость, размеры и массу. Решение этой задачи — современная проблема разработки интегральных интеллектуальных сенсоров (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Интегральные интеллектуальные сенсоры

Проблема	Обеспечение измерения множества физических и (био)химических сигналов
Требования	Низкая стоимость, малый размер, небольшая масса, малая мощность, самотестирование, соединение через шину или беспроводная связь
Как	Интегральные сенсоры, исполнительные механизмы и интеллектуальные интерфейсные ИС, преимущественно в одном корпусе

1.2. Определения различных видов сенсоров

В данном разделе будут представлены определения различных видов сенсоров, а именно:

- сенсоры (обобщенное понятие);
- интеллектуальные сенсоры;
- интегральные интеллектуальные сенсоры;
- интеллектуальные сенсорные системы.

1.2.1 Определение сенсоров относительно физических эффектов

Сенсоры преобразуют сигналы различной энергетической природы в электрические. На рис. 1.3 приведена классификация сигналов по шести физическим явлениям.



Рис. 1.3. Классификация сенсорных сигналов по шести физическим явлениям

Верхняя часть на рис. 1.3 включает все сигналы излучающей или оптической природы. Данные сенсоры способны преобразовывать оптические сигналы в электрические, которые изображены в нижней части рисунка. Пример – датчик изображения, который преобразует изображение в электрический сигнал. Следующий элемент справа – область механических сигналов. Например, акселерометр или датчик подушки безопасности в состоянии преобразовать механическое ускорение в электрический сигнал. Подобным образом термодатчик преобразует температуру в электрический сигнал. Существуют даже электрические сенсоры. Они преобразуют электрические сигналы одних видов в другие, например, для точного измерения разницы потенциалов между двумя кожными электродами на груди пациента. Слева расположена область магнитных сигналов. Пластина датчика Холла в состоянии преобразовать магнитный сигнал в электрический. Наконец, сенсоры химической и биохимической области позволяют трансформировать сигналы этой природы в электрические. В качестве примера можно привести сенсоры pH и ДНК.

Физические эффекты сенсоров можно описать различными уравнениями по локализации энергии или мощности [1]. Параметры кросс-эффектов между различными энергетическими областями описывают перекрестную чувствительность сенсора между этими двумя сигналами. В табл. 1.2 в систематизированном виде приведены физические эффекты, реализуемые в сенсорах. Слева расположены области входных сигналов сенсора. Сверху – области выходных сигналов. Все эффекты по диагонали: левый верх – правый низ, относятся к явлениям в пределах одной физической области. Пример – фотолюминесценция существует в пределах области излучающих сигналов. Все явления в колонке с электрическими выходными сигналами описывают эффекты собственно сенсоров, например, фотопроводимость. Все явления в строке с входным электрическим сигналом описывают эффекты исполнительного механизма.

Далее, сенсоры можно разделить на два типа: пассивные (самогенерирующие) и активные (модулирующие) (рис. 1.4). Пассивные сенсоры, например, электродинамический микрофон, приобретают выходную энергию от входного сигнала; активные сенсоры, например, конденсаторный микрофон, – от внутреннего источника питания. Активные сенсоры могут достигать большого усиления по мощности между входным и выходным сигналами. Сенсорный куб (рис. 1.5) представляет собой трехмерное пространство сигналов: входного, выходного и источника питания.

Таблица 1.2. Физические эффекты сенсоров [1]

Вход/выход	Излучающие	Механические	Термические	Электрические	Магнитные	Химические
Излучающий	Фотолюминесценция	Радиационное давление	Радиационный нагрев	Фотопроводимость	Фотомагнетизм	Фотохимия
Механический	Фотоупругость	Сохранение момента	Фрикционный нагрев	Пьезоэлектричество	Магнито-стрикция	Индукцированный давлением взрыв
Термический	Тепловое излучение	Тепловое расширение	Теплопроводность	Эффект Зеебека	Закон Кюри-Вайса	Эндо-термическая реакция
Электрический	Инжекционная электролюминесценция	Пьезоэлектричество	Эффект Пельтье	Эффект р-п-перехода	Закон Ампера	Электролиз
Магнитный	Эффект Фарадея	Магнито-стрикция	Эффект Эттингсгаузена	Эффект Холла	Магнитная индукция	
Химический	Хемилюминесценция	Реакция взрыва	Экзотермическая реакция	Эффект Вольты		Химическая реакция

Дополнительная классификация сенсоров приведена на рис. 1.6. Различают два класса: открытые системы без обратной связи и замкнутые системы с обратной связью. Пружинные весы — хороший механический пример первой системы; аналитические весы — второй.

Для измерения с помощью аналитических весов объекты необходимо поместить на чаши, чтобы установить стрелку на ноль. Преимущество подобной системы заключается в том, что фактически требуется только сенсор для точного считывания отклонения от нулевой точки. Значение сигнала обратной связи определяет величину измеряемого объекта. В открытой системе сенсор должен обеспечить линейность и точность передачи сигнала.

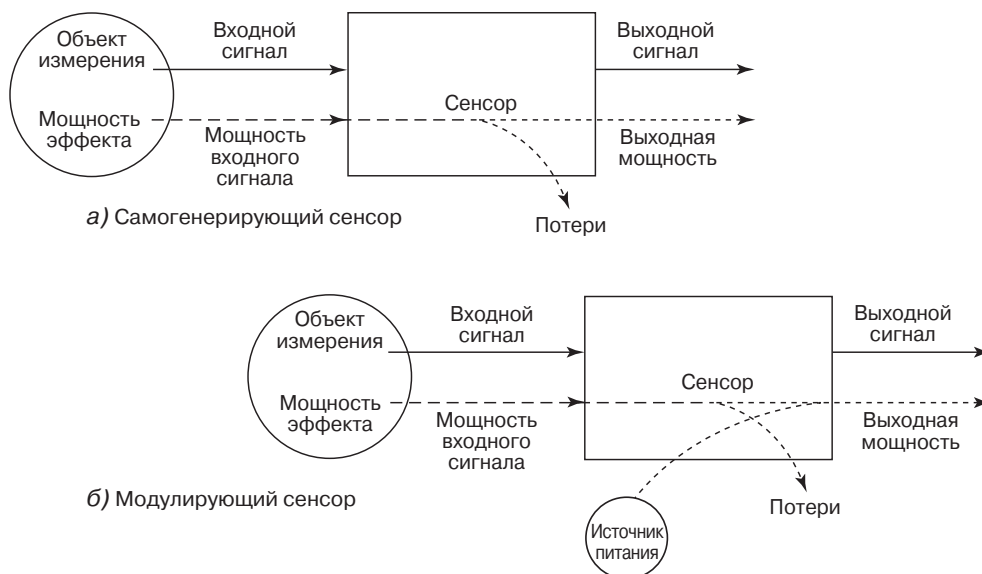


Рис. 1.4. Самогенерирующие и модулирующие сенсоры [2]

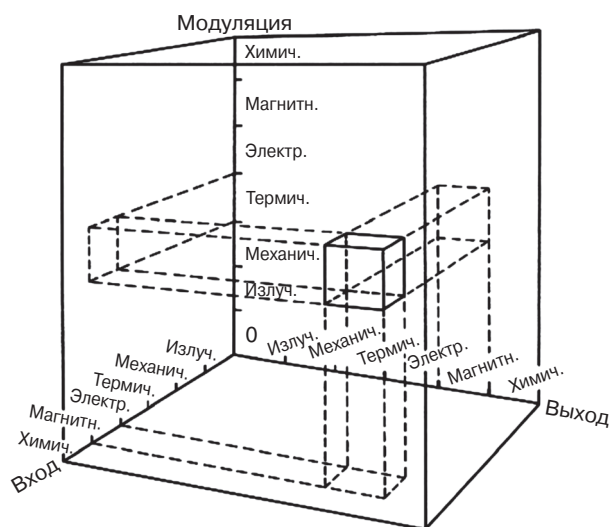


Рис. 1.5. Сенсорный куб [1]

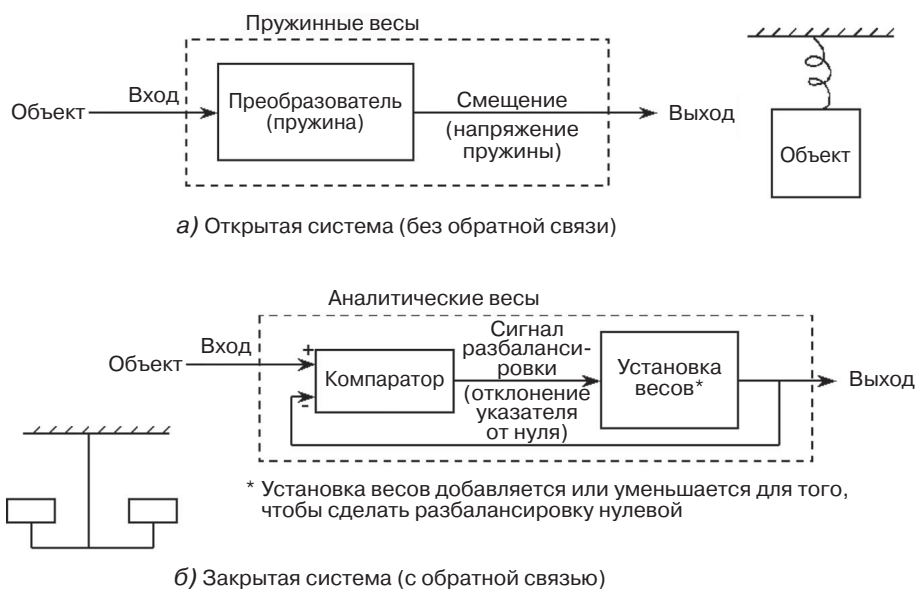


Рис. 1.6. Открытая и закрытая сенсорные системы относительно петли обратной связи

На рис. 1.7 и 1.8 показано множество материалов, которые можно выбирать для создания сенсоров. Полупроводники приобретают все большую популярность как сенсорные материалы из-за их стабильной кристаллической структуры, постоянного улучшения стандартизации при массовом производстве и низкой цены.

Негативное влияние на экономику производства оказывает множество параметров сенсора, которые необходимо измерять (табл. 1.3).

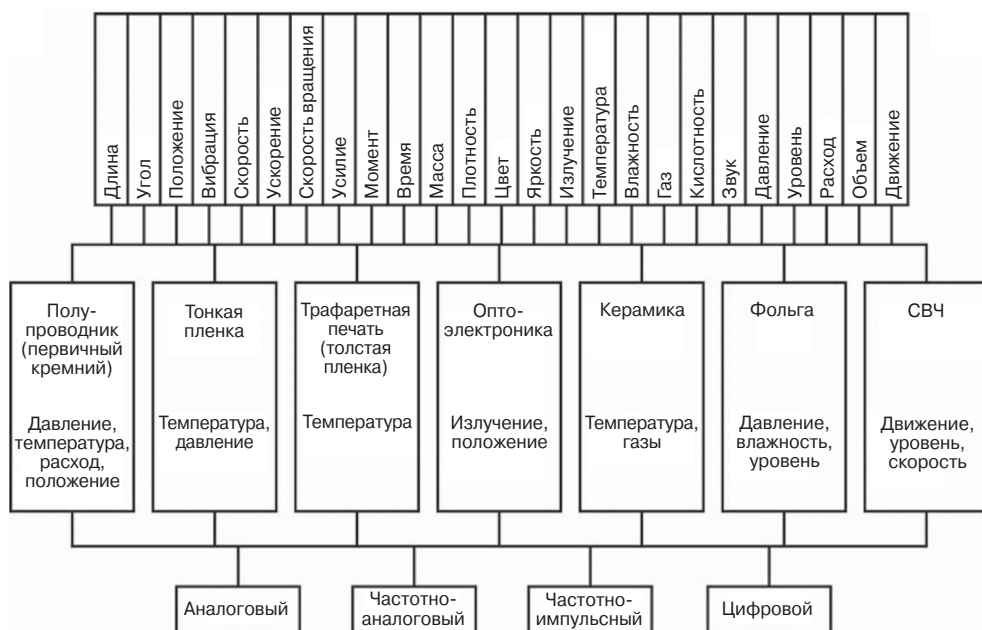


Рис. 1.7. Материалы сенсоров [3]



Рис. 1.8. Какой из них? [2]

Таблица 1.3. Параметры сенсора [3]

1. Механические параметры твердого тела – ускорение – угол – площадь – диаметр – расстояние – упругость – расширение – уровень заполнения – усилие – форма – градиент – твердость – высота – длина – масса – массовый расход – момент – движение – ориентация – шаг – положение – давление – приближенность – число оборотов в минуту – скорость вращения – шероховатость – напряженность – крутящий момент – кручение – скорость – вибрация – путь – масса	2. Механические параметры жидкостей и газов – плотность – направление течения – скорость течения – уровень – давление – расход – вакуум – вязкость – объем 3. Термические параметры – энтальпия (термодинамический потенциал) – энтропия – температура – теплоемкость – теплопроводность – тепловое расширение – тепловое излучение – температура теплового излучения 4. Оптические параметры – цвет – образ – поляризация света – длина волны света – яркость – сила света – отражение – коэффициент преломления	5. Акустические параметры – частота звука – интенсивность звука – поляризация звука – давление звука – скорость звука – время распространения 6. Ядерное излучение – степень ионизации – массовое поглощение – доза излучения – энергия излучения – поток излучения – тип излучения 7. Магнитные и электрические параметры – емкость – заряд – ток – диэлектрическая постоянная – электрическое поле – электрическая мощность – электрическое сопротивление – частота – индуктивность – магнитное поле – фаза	8. Химические параметры – мутность – состав – концентрация – содержание пыли – электропроводность – влажность – лед – включения – степень ионизации – молярный вес – форма частицы – размер частицы – содержание посторонних примесей – значение pH – степень полимеризации – скорость реакции – окислительно-восстановительный потенциал – теплопроводность – содержание воды 9. Другие важные параметры – частота – длительность импульса – количество – время
--	--	--	---

Даже для одного параметра, например, давления, существует множество технических условий: точность, чувствительность, шум, разрешение, динамический диапазон, требования к окружающей среде. Как следствие, на рынке имеются тысячи разнообразных датчиков давления (рис. 1.9).

Другой усложняющий фактор — множество типов выходных сигналов сенсоров. Некоторые из них приведены в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Нестандартные сигналы сенсора

Напряжение	Термопара, межпороговая зона напряжений
Ток	Биполярный транзистор, фазочувствительный детектор, детектор излучения
Сопротивление	Тензометрический мост, датчик Холла
Емкость	Влажность, осязательность, акселерометр
Индуктивность	(трудно встроить в кристалл)

И далее требуется стандартизация и миниатюризация. Выходом из сложившейся ситуации является интеллектуальный сенсор (рис. 1.10).



Рис. 1.9. Чувствительность? Точность? [2]



Рис. 1.10. Интеллектуальный сенсор? [2]

1.2.2. Определение интеллектуальных сенсоров

Интеллектуальный сенсор представляет собой комбинацию из сенсора, аналоговой интерфейсной схемы, аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и интерфейса шины в одном корпусе. Три гибридных интеллектуальных сенсора (рис. 1.11), отличаются по степени интеграции в сенсорной ИС. В этом вопросе требуется стандартизация и, как следствие, повышение интеллектуального потенциала сенсора.

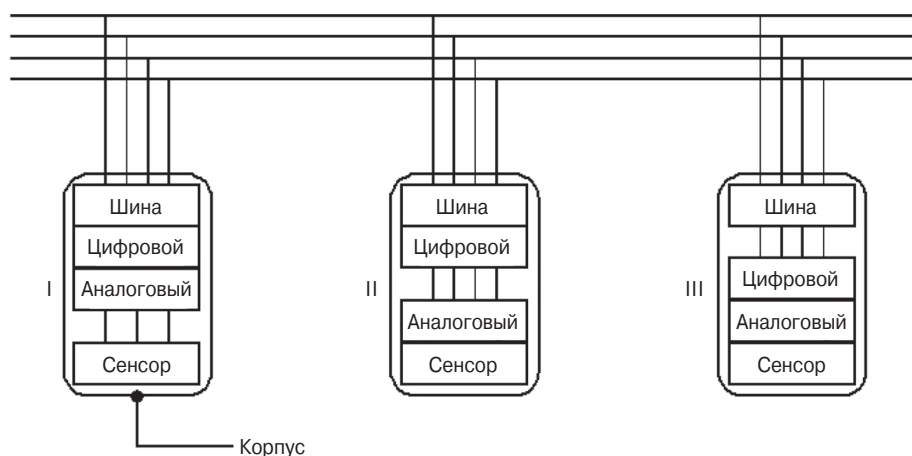


Рис. 1.11. Гибридные интеллектуальные сенсоры

В первом гибридном интеллектуальном сенсоре можно использовать универсальный сенсорный интерфейс (УСИ) для соединения его с цифровой шиной. Во втором — осуществлена интеграция сенсора и блока формирования сигнала. При этом АЦП и интерфейс шины располагаются отдельно. В третьем случае сенсор уже соединен с интерфейсной схемой в одной ИС, что обеспечивает стандартный рабочий цикл или цифровой поток. Шинный интерфейс все еще располагается отдельно.

В этом случае возможно множество форматов выходных сигналов (табл. 1.5).

Таблица 1.5. Стандартные сенсорные интерфейсные сигналы

Формирование сигнала	Аналоговое напряжение Аналоговый ток	0,5 + 4,5 В 4 + 20 мА
Преобразование сигнала	Частота Коэффициент заполнения в стандартном рабочем цикле Цифровой поток Байты	2 ÷ 22 кГц 10 ÷ 90%
Выход шины	IS ² , I ² C, D ² B, полевой, CAN	

1.2.3. Определение интегральных интеллектуальных сенсоров

Если интегрировать все функции от сенсора до шинного интерфейса в одной ИС, получаем интегральный интеллектуальный сенсор (рис. 1.12).

Интегральный интеллектуальный сенсор должен включать все необходимые элементы в одном конструктиве: один или несколько собственно первичных сенсоров, усилители, модулятор и мультиплексоры, АЦП, буферные устройства, шинный интерфейс, адреса, регулирующие и энергетические устройства (рис. 1.13).

Хотя полная интеграция всех функций является достаточно дорогой операцией, тем не менее, при массовом производстве готовых изделий стоимость интегрального сенсора может оставаться на приемлемом уровне.



Рис. 1.12. Интегральный интеллектуальный сенсор

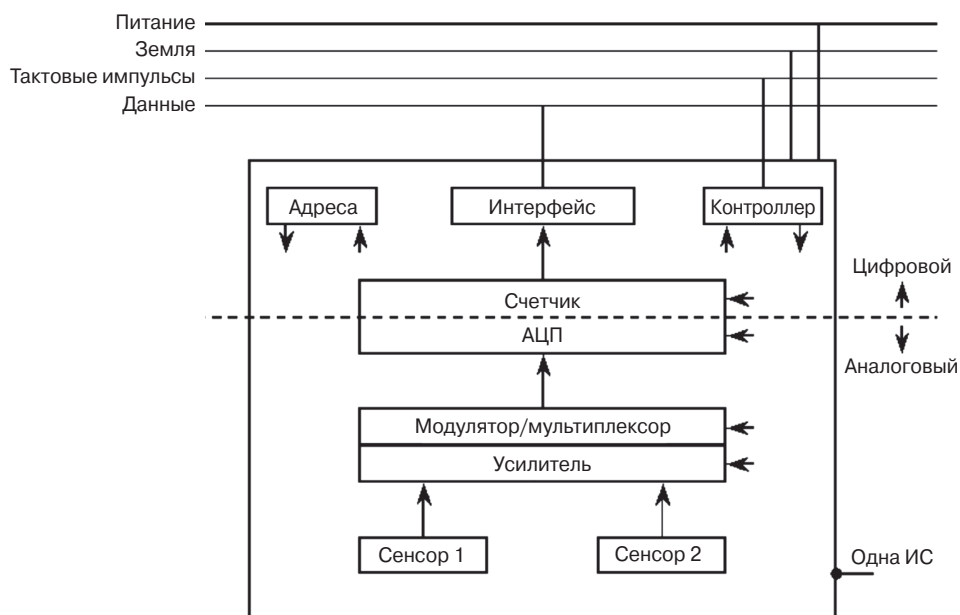


Рис. 1.13. Функции интегрального интеллектуального сенсора

Таблица 1.6. Интегральные интеллектуальные сенсоры

Технология	Производство ИС на основе 3D микроструктурирования, корпусирование
Излучающий	Сенсоры изображения, интегральная адаптивная оптика
Механический	Термоэлектрические сенсоры
Термический	Эффекты пьезо-перехода, механические фильтры
Электрический	Емкостные сенсоры и исполнительные устройства
Магнитный	Сенсоры Холла со спиновыми токами, высокотемпературные сенсоры
Химический	ДНК-детекторы, высокоскоростной анализ



Другая положительная сторона заключается в том, что благодаря простой модульной архитектуре можно существенно сократить стоимость всей сенсорной системы.

Тем не менее, для реализации всех функций на одной ИС необходима интеграция разнообразных сенсоров. С этой целью была разработана технология производства совмещенной ИС на основе трехмерного микроструктурирования. В табл. 1.6 приведен ряд разрабатываемых в настоящее время сенсоров, технологически совместимых с промышленными ИС.

Тем не менее, дополнительно необходимо разработать интерфейсные ИС, пригодные для интеграции в сенсорную ИС. Табл. 1.7 содержит ряд примеров интегральных интеллектуальных сенсоров с интерфейсными ИС на одном кристалле.

Таблица 1.7. Интерфейсные ИС для интегральных интеллектуальных сенсоров

Технология	Маломощные операционные усилители, низкоэнергетические $\Sigma\Delta$ ЦП, интеллектуальная сенсорная шинная система, самотестирование и автокалибровка
Медицинский	Сенсоры ДНК, мультипараметрический сенсор крови, система положения катетера
Научный	Оптический спектрометр, адаптивное зеркало и LC-системы, сенсор волнового фронта
Промышленный	Универсальный преобразователь интерфейсов, емкостной сенсор отпечатка пальцев, термический ветрометр, сенсор абсолютной температуры, быстродействующий химический анализатор, сенсоры Холла со спиновыми токами, акселерометр
Компьютерный	Емкостной человеко-машинный интерфейс

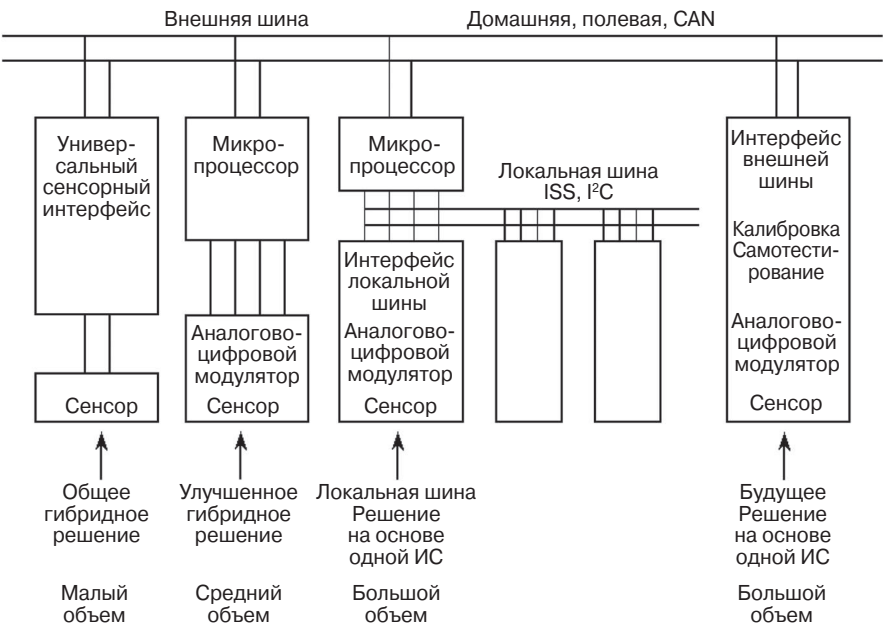
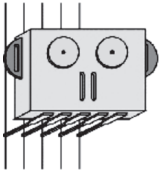


Рис. 1.14. Развитие интеллектуальной сенсорной системы

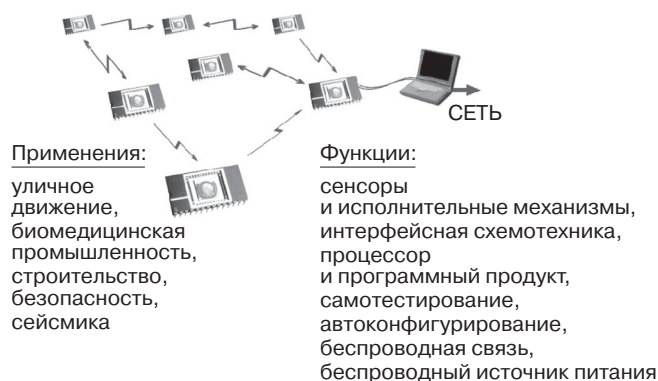


Рис. 1.15. Автономные микросенсоры

1.2.4. Определение интегральных интеллектуальных сенсорных систем

На рис. 1.14 показано развитие интегральных интеллектуальных сенсорных систем с многочисленными промежуточными стадиями. Чем больше рынок интеллектуальных сенсоров определенного типа, тем большая интеграция для них экономически оправдана.

Наша заветная мечта показана на рис. 1.15. Если удастся интегрировать беспроводный источник питания и беспроводную связь, будет создана новая комплексная концепция амбициозных сенсоров, многие из которых можно будет применять в автомобилях, домах, одежде, во время спортивных состязаний для получения ценной информации.

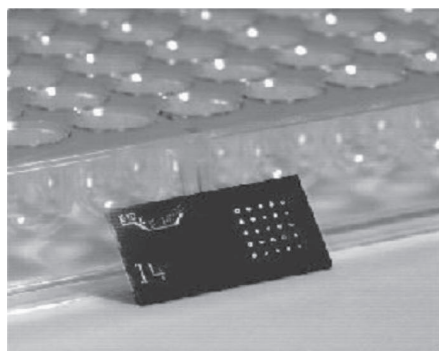
1.3. Автоматизированные производственные машины

Интегральные интеллектуальные сенсоры будут применяться во всех областях повседневной жизни: в интеллектуальных домах и бытовых приборах, автомобилях и производственных машинах. В табл. 1.8 приведены области, где уже используются интегральные интеллектуальные сенсоры в производственных машинах и при профессиональном мониторинге процессов.

В химической и биохимической промышленности применяется большое количество типов сенсоров для анализа химических и биохимических веществ. В качестве примера можно привести быстродействующую скрининговую ИС (рис. 1.16), которая содержит множество наноразмерных отверстий.

Таблица 1.8. Автоматизированные производственные машины и профессиональный мониторинг

(Био)химическая промышленность	Регулирование дорожного движения
Металлургия	Мониторинг окружающей среды
Автомобилестроение	Охрана здоровья
Текстильная промышленность	Контроль состояния здоровья
Пищевая промышленность	Безопасность
Строительство	Автоматизация офисов
Сельское хозяйство	

**Области применения:**

медицина,
процессы ферментации,
анализ биологических жидкостей



Рис. 1.16. Быстродействующий скрининг (Vellekoop)

Каждое отверстие содержит различный химический реагент, а также нагреватель, источник света и фотоприемник. Для анализа требуется всего лишь одна капля образца, поскольку он может заполнить множество наноразмерных отверстий.

Изучение сенсоров в машиностроении с 1995 г. выявило области применения, в которых необходимо применение сенсоров (рис. 1.17).

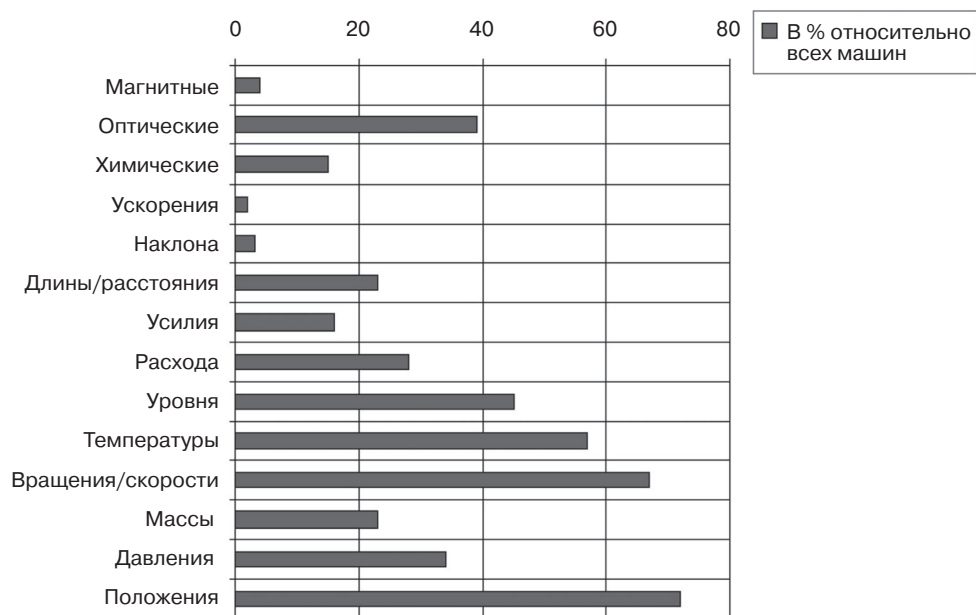


Рис. 1.17. Сенсоры в машиностроении [3]

Кроме того, на рис. 1.18 показаны преимущества использования сенсоров в машиностроении. Очевидно, что тогда обеспечивается повышение уровня автоматизации, например, для своевременной диагностики повреждений оборудования. Как следствие, доля электроники в стоимости машин постоянно увеличивается примерно до 10–20% (рис. 1.19).



Рис. 1.18. Преимущества использования сенсоров [3]

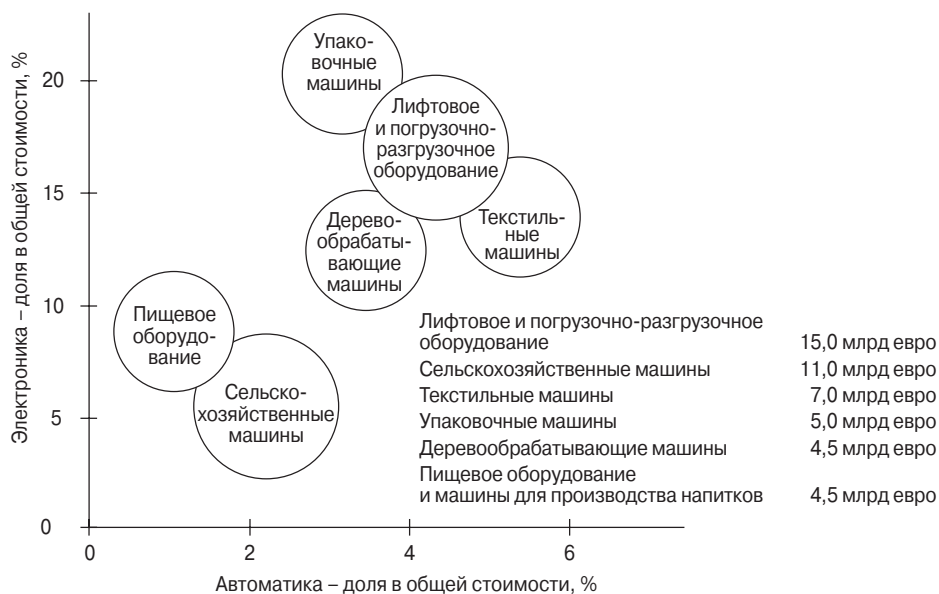


Рис. 1.19. Доля сенсорной электроники в общей стоимости машиностроительной продукции

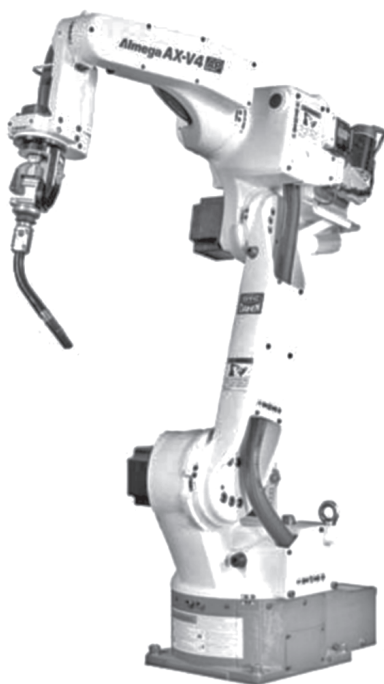


Рис. 1.20. Сварочный робот для производства автомобилей (предоставлено ф. Rolan-Robotics)

Все больше сенсоров используется в сельском хозяйстве. Например, в парниках применяются автоматические устройства, системы регулирования климата и борьбы с вредителями, подачи воды и питательных веществ, роботы для уборки урожая и т.п.

В автомобилестроении современные роботы используются для осуществления сложных сборочных операций (рис. 1.20).

1.4. Автоматизированные потребительские продукты

Автоматизированные потребительские продукты стремительно проникают в нашу жизнь в форме интеллектуальных автомобилей, домов, бытовой техники, игрушек и других изделий.

1.4.1. Интеллектуальные автомобили

В 2005 г. автомобили включали около 40 сенсоров (рис. 1.21). Разместить их станет возможным, если вместо сенсорной системы, соединенной звездой, будет применяться распределенная сенсорная шина. Эту задачу можно решить экономически эффективным способом только в случае использования интеллектуальных сенсоров. В противном случае автомобиль разрушится под весом проводов (рис. 1.22).

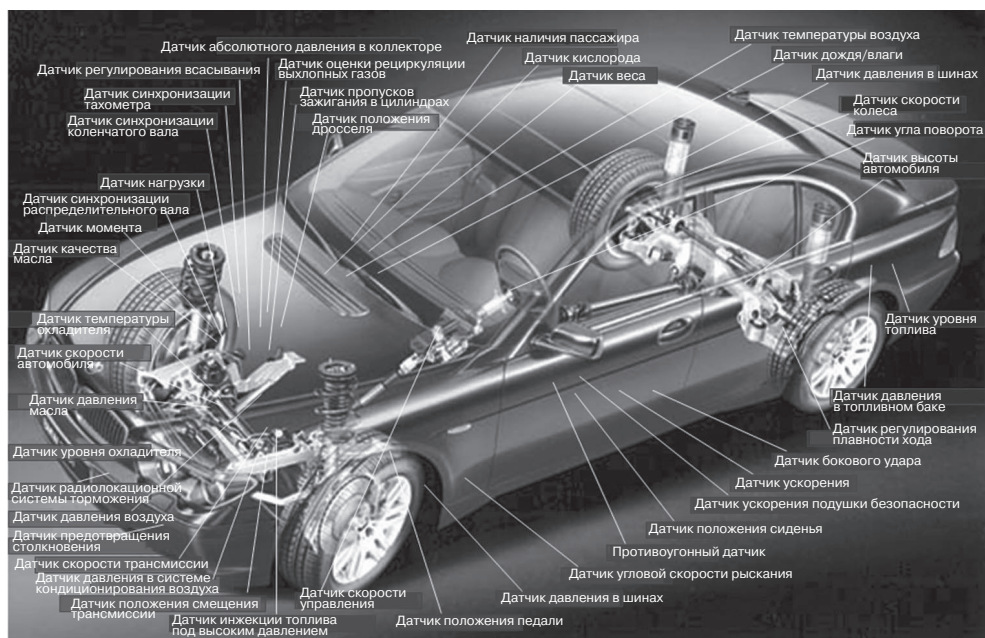


Рис. 1.21. Сенсоры в автомобиле

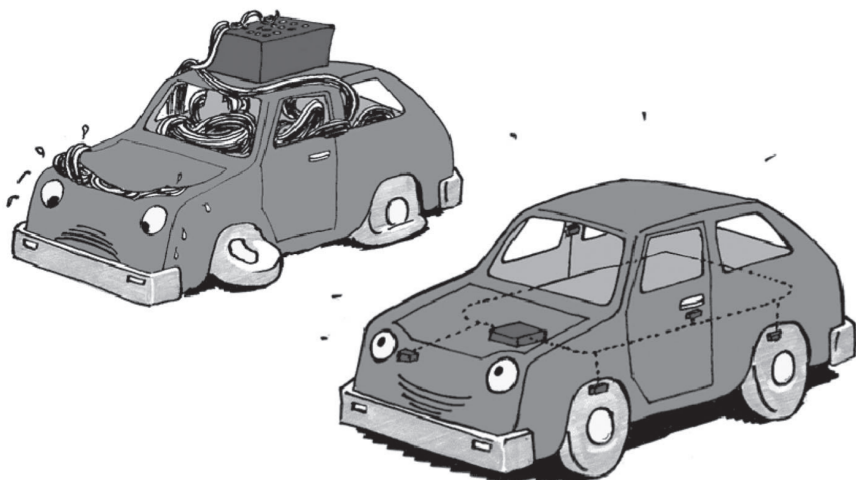


Рис. 1.22. Сенсорные системы, соединенные звездой и с распределительной шиной

1.4.2. Интеллектуальные дома

В «доме будущего», построенного в Росмалене (Нидерланды, 1988 г.), используется множество сенсоров (рис. 1.23).

Подобно автомобилям в домах можно установить большое количество сенсоров, если вместо точечной сети использовать распространенную шинную систему (рис. 1.24).

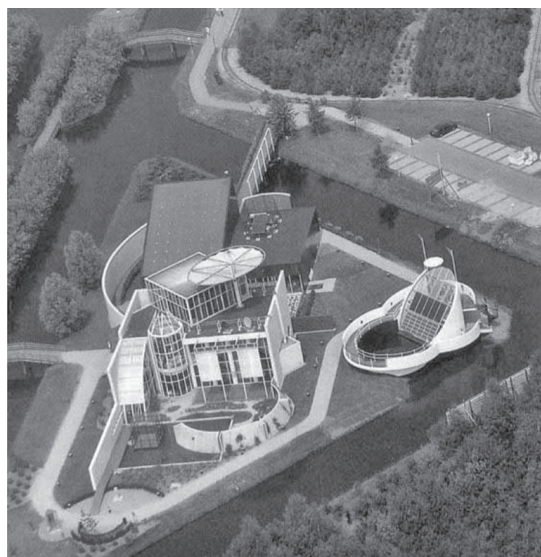


Рис. 1.23. Дом будущего [4]

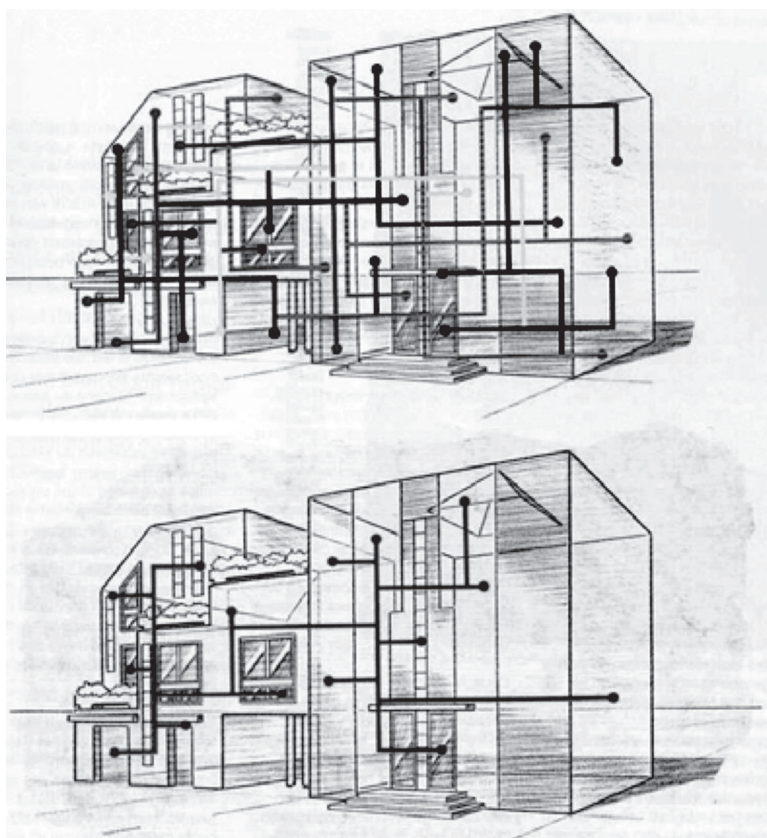


Рис. 1.24. Интеллектуальный дом с сенсорной шинной системой вместо точечной [4]

1.4.3. Интеллектуальные бытовые приборы

Бытовые приборы все еще не в состоянии выполнять весь комплекс работ по домашнему хозяйству. Но придет такое время, когда один раз в неделю пылесос будет автоматически покидать свою базу и перемещаться по комнатам, производя очистку, не натываясь при этом на кота или вазу. Чистить ковер он будет до тех пор, пока тот не станет чистым, и не дольше. После этого пылесос автоматически возвращается на свою базу для зарядки (рис. 1.25).

Холодильник обнаружит снижение запасов определенных продуктов и сообщит об этом, что послужит сигналом для их пополнения.



Рис. 1.25. Очистка дома с помощью автоматического пылесоса iRobot® Roomba®

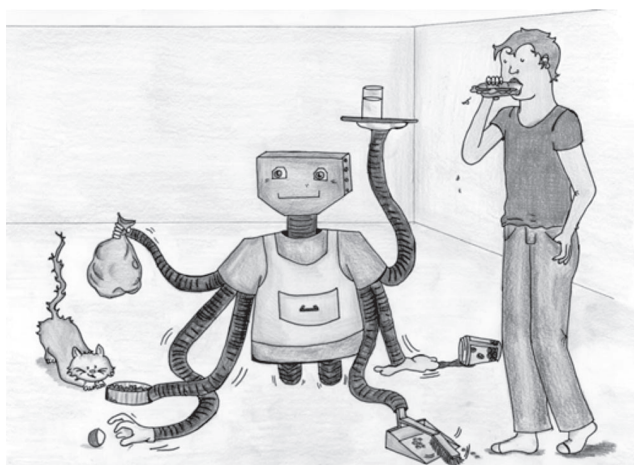


Рис. 1.26. Домашний робот

Стиральная машина определит, сколько необходимо моющих средств для стирки белья и израсходует точно необходимое количество. Она будет осуществлять промывку до тех пор, пока в белье не останется ни малейшего количества мыла, и ни секундой дольше. Стиральная машина незамедлительно остановит полоскание, если красный свитер угрожает окрасить белье в розовый цвет.

Возможно, наступит время, когда в каждом доме будет роботизированный дворецкий, который сможет удовлетворять требования членов семьи (рис. 1.26). Только интегрированные интеллектуальные сенсоры могут обеспечить это.

1.4.4. Интеллектуальные игрушки

Игрушки могут выглядеть как живые существа, если будут снабжены сенсорами. Пример – AIBO компании Sony (рис. 1.27).

Используемые в виртуально-реальных перчатках сенсоры позволяют производить мониторинг движений, что дает возможность адаптироваться к наблюдаемой виртуальной реальности (рис. 1.28).

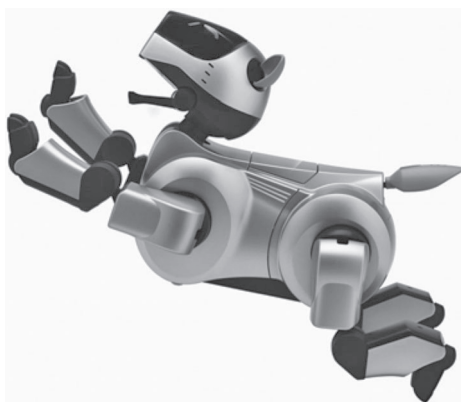


Рис. 1.27. AIBO (компания Sony Benelux B.V.)



Рис. 1.28. Ощущение и видение виртуальной реальности (Sunrise Virtual Reality Inc.)



Рис. 1.29. Игра в теннис по всему миру

Симулятор гонок можно использовать для инструктажа по играм или вождению. В настоящее время симулятор позволяет даже играть (в теннис) с кем-нибудь на другом конце света (рис. 1.29).

1.5. Заключение

Показано, как третья промышленная революция может стать реальностью за счет использования интеллектуальных сенсорных систем. Рассмотрено их применение в таких областях, как автоматизированные производственные машины и автоматические потребительские продукты.

Литература

1. Middelhoek, S. and Audet, S.A. (1989). *Silicon Sensors*, Academic Press. Reproduced by permission of S.Middelhoek.
2. Ohba, R. (1992). *Intelligent Sensor Technology*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
3. Centrum voor Micro-Elektronica (1993). *Use of Sensors and Actuators in the German and Dutch Machine Building Industries*. Reproduced by permission of Ton van Schadewijk.
4. Titulaer, C. and de Kort, N. (1991). *Kantoor van de Toekomst*, Chriet Titulaer Producties, Houten. Reproduced by permission of Chriet Titulaer.

ГЛАВА 2

ИНТЕРФЕЙСНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СЕНСОРНЫХ СИСТЕМ

Джерард К. М. Мейджер

2.1. Введение

В интеллектуальных сенсорных системах функции сенсоров и их интерфейсов объединены в общей системе, включающей первичное преобразование параметра среды, формирование электронного сигнала, аналогово-цифровое преобразование, сопряжение с шиной и обработку данных. В эту совокупность могут включаться также функции более высокого иерархического уровня, например, самотестирование, автокалибровка, оценка и идентификация данных. Во многих физических и химических сенсорах ширина полосы пропускания информации достаточно узкая, намного уже, чем полоса пропускания электронного узла системы. Это дает возможность проектировщику при реализации сложных измерений применить одну электронную систему поддержки нескольких чувствительных элементов. Кроме того, можно использовать избыточность соотношения время/полоса пропускания электронного узла с целью повышения точности, надежности, длительной стабильности системы или уменьшения потребляемой мощности. В этой главе обсуждаются вопросы возможных технологий измерения, предназначенных для улучшения системы, а также пути их реализации в схемах на основе интеллектуальных сенсоров и интерфейсов. Кроме того, будет показано, как применение передовых технологий измерения, например, вложенного прерывания, динамического согласования элементов и автокалибровки, позволяет решить традиционные проблемы электронных схем, в частности, смещение, шум $1/f$, интерференционные наводки и длительный дрейф.

Рассматриваемая система состоит из ряда мультиплексированных чувствительных элементов, специфических для сенсора внешних интерфейсов, модуляторов или преобразователей, а также микроконтроллера или цифрового сигнального процессора (ЦСП). Подобные системы хорошо укладываются в стандартные сборки в соответствии с нормами IEEE 1451 [1].

В главе представлен объектно-ориентированный подход проектирования, как наиболее приемлемый метод быстрого конструирования недорогих и высокоэффективных систем.

Многие чувствительные элементы имеют характерную проблему — перекрестную чувствительность: кроме чувствительности к измеряемому параметру они об-

ладают нежелательной чувствительностью к другим физическим величинам. Более того, помимо требуемого электрического выходного сигнала они проявляют паразитные электрические эффекты. В этой главе рассматривается вопрос, каким образом можно обеспечить селективное обнаружение измеряемой величины с высокой невосприимчивостью в отношении паразитных эффектов, мешающих сигналов и дрейфа параметров. Представлена сборка, в которой аналоговые сенсорные сигналы преобразуются в аналоговые сигналы временной области с использованием модулированных по времени генераторов. Аналогово-цифровое преобразование сигнала временной области можно реализовать в микроконтроллере или ЦСП.

Для демонстрации возможных решений по разработке электронного узла системы рассматриваются два случая: универсальный сенсорный интерфейс и динамический процессор напряжения.

2.2. Объектно-ориентированное проектирование сенсорных систем

Характеристики системы в значительной степени можно улучшить, а затраты сократить за счет объединения и переоценки функций сенсоров, исполнительных механизмов, аналоговых интерфейсных схем и цифровых процессоров в рамках одной конструкции. Там, где это позволяет технология, систему можно реализовать на общей подложке или однокристалльной ИС.

В этой главе рассматриваются сенсорные системы, ориентированные на недорогой средний по размерам рынок промышленных сенсоров. Согласно [2], при проектировании сенсорной системы традиционные подходы сверху — вниз (декомпозиция) и снизу — вверх (композиция) имеют серьезные ограничения, которые обусловлены междисциплинарным и относительно открытым характером сенсорных подсистем. Как следствие, традиционные методы проектирования часто требуют слишком много итерационных шагов, увеличивается продолжительность конструирования, да и сама конструкция не получается достаточно гибкой. Для преодоления этих ограничений следует использовать максимальную унификацию конструкций и характеристик применяемых элементов. По аналогии с подходом проектирования при разработке программного обеспечения Toth называет его объектно-ориентированным. На рис. 2.1 приведена возможная конфигурация аппаратного обеспечения, составленная на основе такого подхода для сенсорной системы, в которой применяются функционально-сложные компоненты, например, микроконтроллеры, персональные компьютеры, а также сенсорные интерфейсы (разд. 2.6 и гл. 10). Наличие памяти в микроконтроллере дает возможность аккумулировать данные, полученные от нескольких сенсоров, в течение длительного периода времени. Это обеспечивает реализацию нескольких важных функций системы, например, автокалибровку, самотестирование, компенсацию и фильтрацию нежелательных сигналов и эффектов. Как будет показано в разд. 2.4, аналогово-цифровое преобразование можно осуществить в микроконтроллере, который в состоянии выполнить эту задачу даже без применения встроенного АЦП при преобразовании сенсорного сигнала во временную область с использованием периодического модулятора в интерфейсе преобразователя.

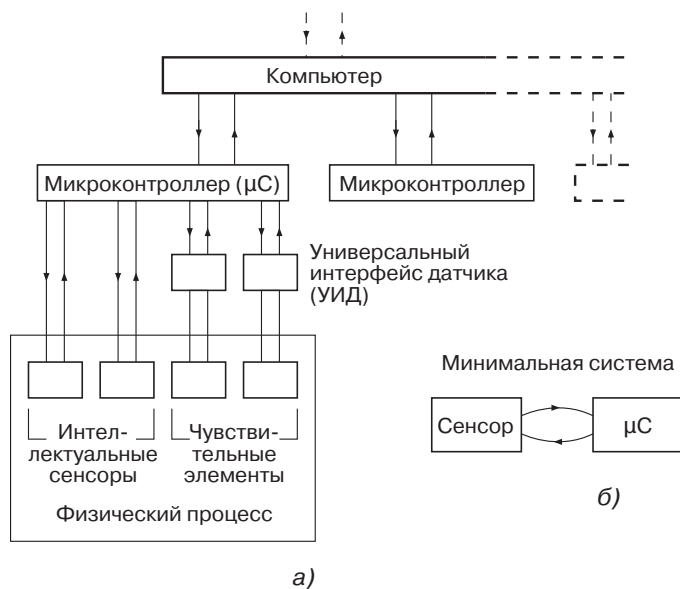


Рис. 2.1. Возможная конфигурация аппаратного обеспечения интеллектуальной сенсорной системы

Интерфейс датчика оснащен электронными средствами внешней связи для сенсоров разных типов. Иногда, но не всегда, можно объединить функции чувствительных элементов и их интерфейсов и реализовать их на одном кристалле ИС, создав, тем самым, «интеллектуальный сенсор» (см. рис. 2.1). В любом случае электрические параметры электронных средств внешней связи должны точно соответствовать характеристикам чувствительных элементов, принимая во внимание специфические свойства и различные реальные условия. При разработке объектно-ориентированное проектирование будет способствовать ускорению процесса конструирования и позволит экономить средства. Для достижения этой цели важно понять основные свойства и проблемы наиболее распространенных типов чувствительных элементов и сенсорных систем. В следующем разделе будет приведено описание подхода для проектирования сенсорных систем высокой точности в широком динамическом диапазоне, когда необходимо уменьшить влияние паразитных элементов. С описанием других аспектов проектирования, например, простоты и легкости создания прототипа, читатель ознакомится в гл. 10.

2.3. Чувствительные элементы и сопровождающие паразитные эффекты

Существует достаточно большое разнообразие сенсорных элементов, а некоторые из них, например, видеосенсоры, настолько специализированные устройства, что рассмотрение их характеристик выходит за рамки означенной тематики. В этой книге в основном рассматриваются сенсорные системы с относительно узкой физической полосой пропускания (менее 10 кГц). Даже при таком ограничении воз-

никает множество подлежащих решению проблем, происхождение которых связано со сложностью физических и электрических используемых эффектов и желанием добиться высокой избирательности и точности измеряемых параметров специфических величин при наличии большого числа паразитных воздействий и возмущающих сигналов. В данном разделе будут рассмотрены подобные проблемы и представлены способы или стратегии их решения.

2.3.1. Совместимость компоновки

Почти для всех типов чувствительных элементов компоновка является основной проблемой проектирования: с одной стороны, для осуществления своих базовых функций контакт между чувствительным элементом и физической или химической средой должен быть максимально хорошим, с другой стороны, близкий контакт может послужить причиной его деградации или разрушения. Поэтому чувствительный элемент следует корпусировать таким образом, чтобы он мог функционировать при различных условиях внешних воздействий: механические удары, высокие температуры, коррозионные среды. В интеллектуальных сенсорных системах необходимо защищать не только чувствительный элемент, но и остальные их элементы, что может существенно усложнить проблему корпусирования. По этой причине в качестве первых интеллектуальных сенсоров на рынке появились именно те, в которых наиболее легким способом удалось решить эту проблему. К ним, в частности, относятся сенсоры температуры и ускорения. Например, в интеллектуальных сенсорах температуры ИС можно поместить в герметично закрытый металлический корпус (рис. 2.2) [3]. При точно выполненном тепловом расчете температура внутри и вне корпуса будет одинаковой, поэтому защитный конструктив не нарушает надлежащее функционирование сенсора.

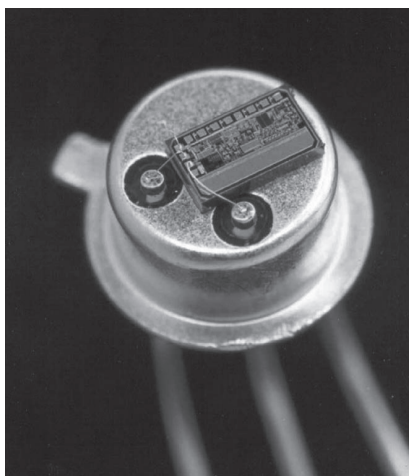


Рис. 2.2. Интеллектуальный температурный сенсор, размещенный в металлическом корпусе типа ТО-18. После конструктивной герметизации (на рисунке не показано) корпус испытывается по размеру и герметичности (опубликовано с разрешения ф. Smartec)

Намного труднее разработать подходящую технологию корпусирования для химических сенсоров. В гл. 5 показано, что преобразование химических параметров в электрические позволяет снизить остроту этой проблемы.

2.3.2. Влияние импеданса кабеля и проводника

Следует предпринять меры, чтобы избежать влияния импеданса соединительных проводов и кабелей на результаты измерения. Этого можно добиться за счет проведения так называемых двухполюсных измерений. На рис. 2.3а приведена хорошо известная двухполюсная схема, которая применяется для измерения низкоомного сенсорного импеданса Z_x . В этом случае последовательные импедансы $Z_{s1} \dots Z_{s4}$ соединительных кабелей не оказывают влияния на измеряемое напряжение V_{sense} . В случае реализации этой технологии измерения необходимо, чтобы интерфейсная ИС обеспечивала ток возбуждения и измеряла напряжение до Z_x , используя соответственно высокоимпедансный источник тока и высокоимпедансный входной усилитель. На рис. 2.3б показан второй случай, который применяется для измерения высокоомной полной проводимости Y_x сенсора с напряжением возбуждения V_{force} и током короткого замыкания I_{force} через Y_x . Шунтирующие импедансы Y_{p1} и Y_{p2} соединительных кабелей не оказывают влияния на результаты измерений. Такая технология измерения позволяет определять малые емкости сенсоров C_x даже в тех случаях, когда соединительные кабели имеют паразитные емкости C_{p1} и C_{p2} , по величине превышающие C_x . Для реализации этой технологии измерения необходима интерфейсная ИС для создания напряжения возбуждения и измерения тока через Y_x с использованием низкоимпедансного источника напряжения и низкоимпедансного входного усилителя, соответственно.

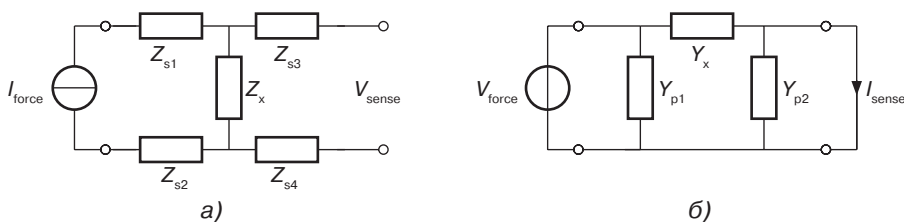


Рис. 2.3. Два случая двухполюсного измерения: сенсор с низким значением Z_x (а), сенсор с низким значением Y_x (б)

2.3.3. Паразитные и взаимные эффекты в чувствительных элементах

Существует большая группа простых чувствительных элементов, электрические свойства которых могут быть охарактеризованы посредством единичного компонента электрической цепи, а значение параметра этого компонента определяется измеряемым физическим сигналом. Обычно для чувствительных элементов существенна проблема взаимных эффектов: они обладают нежелательной чувствительностью к другим физическим воздействиям, например, температуры, меха-

нической вибрации и др. Применение дополнительных чувствительных элементов может обеспечить получение информации для повышения надежности и компенсации взаимных воздействий. Например, использование дополнительных сенсоров температуры позволяет реализовать режим температурной компенсации, а информация, полученная в результате измерения сопротивления в термопаре, может быть полезной для мониторинга процессов коррозии.

В случае наличия взаимных воздействий измеряемая величина и нежелательные физические эффекты оказывают влияние на один и тот же электрический выходной параметр S_x . Кроме того, чувствительные элементы также обладают паразитными электрическими эффектами физической, химической или электрической природы, которые можно смоделировать посредством дополнительного паразитного электрического компонента S_p . Например, ток утечки в емкостном сенсоре влажности служит причиной появления паразитного сопротивления R_p , шунтирующего емкость сенсора C_x (рис. 2.4а). Обычно производители не предоставляют подробную информацию относительно этого шунтирующего сопротивления. Более того, его величина имеет долговременный дрейф и зависит от температуры. Поэтому при проектировании электронной схемы измерения емкости C_x следует учитывать самые неблагоприятные условия для резистора R_p . Одна из нижеприведенных мер поможет решить эту проблему:

- Использование сигнала возбуждения большей частоты приведет к снижению относительного влияния R_p . Тем не менее, ограничение по полосе пропускания сужает спектр возможностей применения этого метода.
- В случае использования синусоидального сигнала возбуждения амплитудно-фазовым анализатором возможно отдельно измерять величины C_x и R_p . Однако применение синусоидальных сигналов повышает уровень сложности и энергопотребления системы.

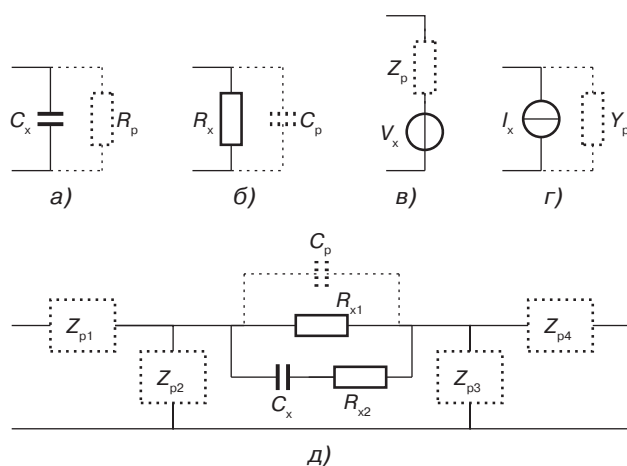


Рис. 2.4. Примеры эквивалентных электрических схем, моделирующих некоторые типичные чувствительные элементы и их паразитные электрические компоненты: простые элементы (а–г); более сложный чувствительный элемент (д)

- В случае прямоугольных сигналов можно осуществить последовательность измерений при различных частотах тока возбуждения. Алгоритмическая обработка результатов измерения позволит существенно уменьшить эффект шунтирующего сопротивления [4]. Этот метод требует затрат времени, хотя и реализуется посредством простой электронной схемы.
- Максимально быстрая разрядка заряженной емкости позволит сократить потери заряда и тем самым снизить относительный эффект шунтирующего сопротивления [5].

При соединении резистивного сенсора с помощью длинного кабельного провода с электронным сигнальным процессором емкость кабеля может привести к появлению шунтирующей емкости C_p (рис. 2.4б). По аналогии с предыдущим случаем проблему можно решить за счет одного из нижеприведенных измерительных приемов:

- использование сигнала возбуждения пониженной частоты приведет к снижению относительного воздействия C_p . Однако для уменьшения эффекта низкочастотного шума и помех желательно увеличить эту частоту (см. разд. 2.3.4);
- в случае применения синусоидального сигнала возбуждения амплитудно-фазовым анализатором возможно отдельно измерять величины C_x и R_p . Но тогда значительно повышается уровень сложности и энергопотребление системы.

Генерирующие напряжение сенсоры, например, термопара или сенсор pH, имеют высокое или даже очень высокое внутреннее сопротивление (рис. 2.4в). В этом случае необходимо проявлять особое внимание для минимизации эффекта утечки и входных токов электронного сигнального процессора. По аналогии для генерирующих ток сенсоров, например, фотодетекторов (рис. 2.4г), входное напряжение и входной импеданс электронного сигнального процессора необходимо поддерживать на минимально возможном уровне, чтобы уменьшить эффект паразитного шунтирующего сопротивления.

На рис. 2.4д изображена более сложная модель, отображающая, например, импедансный сенсор, который возможно использовать для измерения электрических свойств жидкости. Все элементы C_p , R_{x1} и R_{x2} могут содержать определенную существенную информацию о свойствах жидкости. Точное измерение различных элементов представляет собой серьезную проблему, поскольку они имеют такие величины, которые можно определить только с использованием специальных частот, что усложняет процедуру измерения. Более того, параметры модели могут проявлять частотную зависимость, что приводит к еще большему усложнению задачи измерения. Дополнительно к этому электрохимический контакт между твердотельными проводниками и жидкостью носит сложный характер, который можно смоделировать посредством паразитных импедансов Z_p . На первом этапе в ходе исследования можно использовать анализатор цепей для оценки свойств сборки с целью измерения импеданса. Как правило, такие анализаторы имеют большие габаритные размеры, дороги и потребляют много энергии. К серьезным задачам проектировщика интеллектуальной сенсорной системы можно отнести: уменьшение до минимума сложности и размеров сборки, сокращение энергопотребления, снижение стоимости системы. Наблюдается постоянный рост интере-

са к подобным импедансным сенсорам, которые можно использовать для измерения различных характеристик, в частности, влажности и содержания воды в материале, уровня и проводимости воды, концентрации ионов и др. С помощью импедансных сенсоров можно установить наличие микроорганизмов внутри бутылки молока, не открывая ее. С этой целью была разработана специальная интерфейсная схема, позволяющая измерять проводимость молока внутри бутылки с использованием внешних электродов [6]. Чтобы выявить различия между резистивными и емкостными компонентами измеренного импеданса, испытания производятся с использованием различных сигналов возбуждения и схем разнообразной конфигурации. В качестве примера на рис. 2.5 приведено измерение сопротивления молока во время испытания на зараженность *Salmonella Typhimurium*.

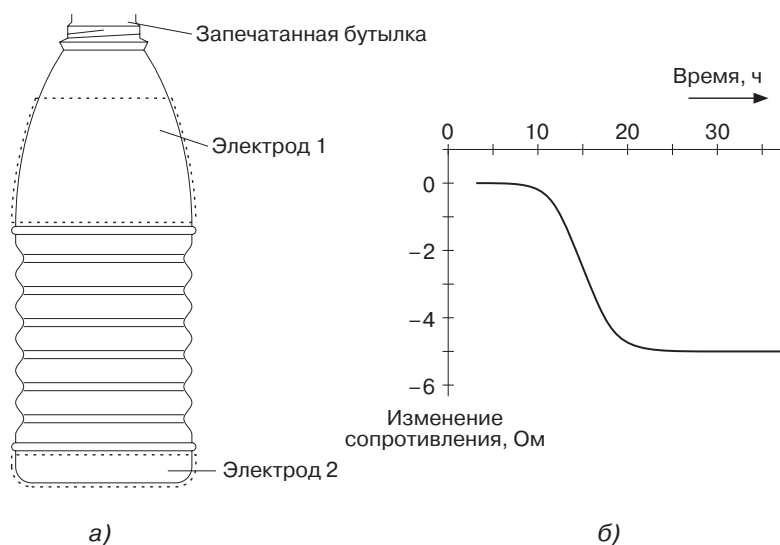


Рис. 2.5. Обнаружение микроорганизмов в упакованных пищевых продуктах с использованием импедансного сенсора: пластиковая бутылка с внешними электродами (а); измерение сопротивления во время испытания при заражении Сальмонеллой (б) (Nihtianov [6])

2.3.4. Сигналы возбуждения для чувствительных элементов

В случае пассивных сенсоров (резистивных, емкостных или индуктивных) интерфейсная схема генерирует сигналы возбуждения. Это дает возможность проектировщику интерфейса выбрать наиболее подходящий тип и величину сигнала возбуждения для упрощения и повышения точности системы, а также минимизации рассеиваемой мощности.

Форма волны: у проектировщика существует выбор, например, между сигналами постоянного тока, прямоугольной, треугольной, синусоидальной или импульсной формы. В общем случае, каждый из этих сигналов имеет свои преимущества и недостатки:

- сигналы постоянного тока простые по форме, но сопровождаются мощными помехами, с которыми они должны быть разделены. Перечень помех включает: напряжение смещения усилителя, смещение дрейфа, низкочастотный ($1/f$) шум, помехи в питающей линии, паразитные напряжения Зеебека и др. Иной недостаток сигналов постоянного тока — возникновение электролитических эффектов. По этой причине сигналы постоянного тока часто не используются;
- преимущество прямоугольных сигналов: их генерация осуществляется с помощью очень простых цифровых схем (управляемый переключатель), которые практически не потребляют энергии;
- преимущество синусоидальных сигналов: при использовании правильно спроектированных фильтров состоит в достижении превосходного соотношения сигнал/шум. Однако по сравнению с прямоугольными сигналами их обработка требует применения схем со значительно большей рассеиваемой мощностью и значительной степенью сложности;
- импульсные сигналы достаточно хорошо подходят для формирования селективности специфических многоходовых сигналов. При использовании соответствующим образом спроектированных временных окон требуемый сигнал можно легко выделить из отраженных сигналов, следующих по более длинному пути распространения.

Величина: с точки зрения соотношения сигнал/шум, возбуждение должно производиться максимально большим по амплитуде сигналом. С другой стороны, нелинейность чувствительных элементов ограничивает оптимальную величину возбуждения. Кроме того, необходимо предпринять меры по устранению нежелательного электрофизического взаимодействия. Например:

- электрическое возбуждение резистивного сенсора температуры приводит к самонагреву, что может вызвать возникновение ошибки измерения (гл. 7). Именно разработчик должен оптимизировать характеристики системы с точки зрения термических условий для конкретной области применения;
- в электропроводящих сенсорах возбуждение может вызвать электролиз. Поэтому напряжение возбуждения должно быть меньше потенциала, вызывающего коррозию.

2.4. Аналогово-цифровое преобразование

Во входных цепях традиционных систем генерируемые электрические сенсорные сигналы часто преобразуются в напряжение, что дает возможность применять стандартный аналогово-цифровой преобразователь. Более подробное обсуждение принципов действия различных АЦП для сенсорных систем приведено в работе [7]. В гл. 10 также рассматривается альтернативный способ аналогово-цифрового преобразования, позволяющий упростить и оптимизировать систему.

В качестве примера на рис. 2.6а показана сенсорная система емкостного чувствительного элемента C_x , в которой применяется обычный серийный АЦП. Эк-

вивалентные конденсаторы C_{p1} и C_{p2} являются паразитными емкостями соединяющих кабелей. Недостаток этой схемы заключается в том, что АЦП требует аналогового входного напряжения, в значительной степени усложняющего конструкцию аналогового интерфейса. Процесс точного преобразования сигнала емкостного сенсора в напряжение — достаточно сложная операция и требует многочисленных дополнительных операций, что приводит к увеличению количества компонентов схемы, числа шагов преобразования и изменению их качества. Однако систему можно в значительной степени упростить. При незначительных затратах многие традиционные внутренние функции АЦП удастся объединить с реализациями аналоговых задач других подсистем.

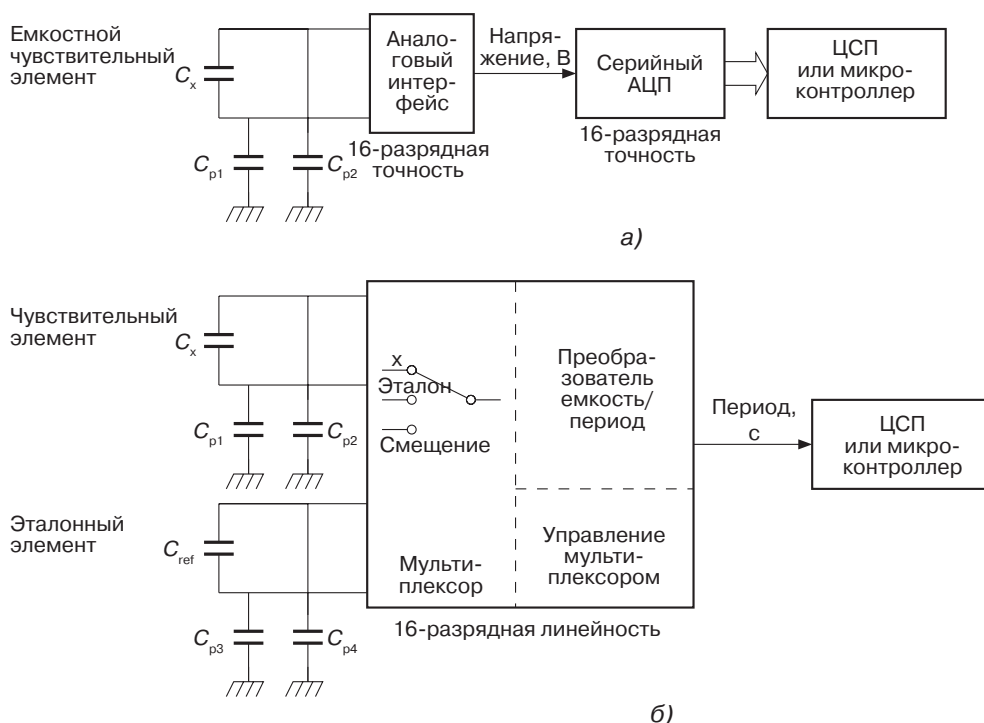


Рис. 2.6. Некоторые возможные схемы: традиционная схема (а), схема, где АЦП реализуется в микроконтроллере (б)

Например, режим выборки и хранения, дискретизация и цифровая фильтрация и даже преобразование $\Sigma-\Delta$ легко реализуются в ЦСП или микроконтроллере. Небольшая, но важная интерфейсная часть функции АЦП легко объединяется с остальной частью входной схемы. В результате получается представленная на рис. 2.6б сборка. Преобразователь емкость—период можно применять вместе с релаксационным генератором, период колебаний которого изменяется линейно относительно значений сигнала чувствительного элемента, таким образом, генерируется модулированный по периоду выходной сигнал (рис. 2.7). Чувствительный элемент является составной частью интерфейсного генератора.

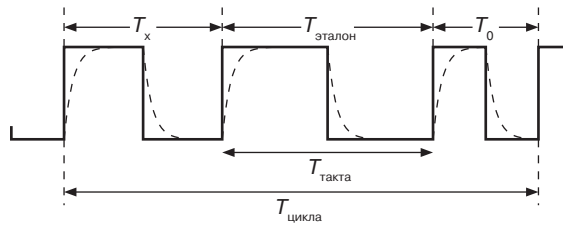


Рис. 2.7. Модуляция по периоду: обнаруженный сигнал устойчив к изменению постоянной времени выходного каскада (пунктирные линии)

Одновременно сигнал этого генератора используется для возбуждения чувствительного элемента. Тем самым, отпадает необходимость в применении отдельного генератора возбуждения и синхронного детектора. АЦП частично интегрирован с ЦСП или микроконтроллером, в то время как другая часть (меньшая) реализуется в интерфейсной электронной схеме. Микроконтроллер и ЦСП имеют возможность измерять частоту или временные интервалы, используя свои внутренние счетчики. Модуляторы частоты и периода легко реализуются в интерфейсной схеме. По сравнению с модуляцией частоты модуляция по периоду обладает тем преимуществом, что позволяет ограничивать эффект задержки по времени при использовании автокалибровки (разд. 2.5.3).

Это можно объяснить тем, что режим автокалибровки устраняет все возникающие дополнительные погрешности, в том числе и задержку по времени. По сравнению с альтернативной широтно-импульсной модуляцией модуляция по периоду обладает лучшей устойчивостью к значению постоянной времени электронного выходного каскада (рис. 2.7). Поэтому в настоящей главе мы ограничиваемся рассмотрением модуляции по периоду. Каждый период или группа периодов может представлять определенные измеряемые параметры. Для идентификации различных периодов необходимо иметь один, который короче, чем все остальные. Обычно в качестве идентификационного сигнала выбирают измерение смещения (гл. 10).

Модулированный по периоду сигнал является аналоговым во временной области. При поступлении этих сигналов на вход таймера микроконтроллера внутренний счетчик с использованием асинхронных селекторных импульсов может осуществить дискретизацию длины их периода (рис. 2.8).

В современных микроконтроллерах частота дискретизации подобных счетчиков колеблется в диапазоне $0,1 \div 1$ мкс. Для быстрой обработки входных сигналов в микроконтроллере необходимо использовать регистр захвата (гл. 12). Шум квантования вследствие дискретизации пропорционален частоте дискретизации и обратно пропорционален периоду T_x . В универсальном интерфейсе преобразователя (УИП) (разд. 2.6 и гл. 10) внутренняя частота составляет 50 кГц. Счетчик действует как интегратор. Для снижения шума квантования можно применять делитель внутренней частоты, который позволяет уменьшить выходную частоту, например, в 128 или 1024 раза за счет увеличения времени измерения. Когда одновременно требуются малые времена дискретизации и измерения, применяется внешний быстросрабатывающий счетчик.

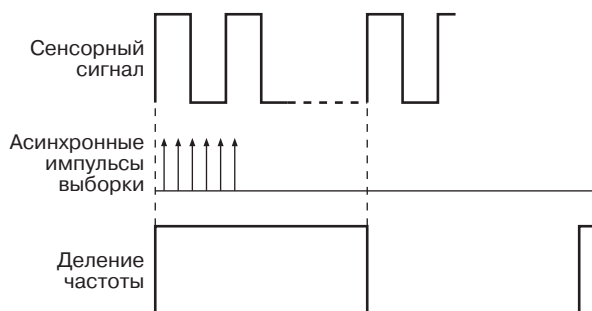


Рис. 2.8. Аналогово-цифровое преобразование с использованием асинхронной дискретной системы

Данное решение было выбрано Gasulla [8] для использования в емкостных сенсорных системах (гл. 8). Шум квантования можно уменьшать еще более эффективно за счет использования преобразователей типа $\Sigma-\Delta$. В подобного рода конверторах для снижения шума в полосе частот модулирующих сигналов применяется метод передискретизации [7]. Затем фильтр низких частот устраняет повышенный шум при более высоких частотах. Для достижения лучших шумовых характеристик порядок фильтра должен превышать число используемых интеграторов, по крайней мере, на единицу. Таким образом, в конвертере первого порядка должен применяться, по меньшей мере, фильтр второго порядка. В микроконтроллере его можно использовать в качестве цифрового фильтра. В целом, разрешение и скорость измерения рассмотренной выше асинхронной дискретной системы (см. рис. 2.8) немного лучше, чем в случае преобразователя $\Sigma-\Delta$ первого порядка [9].

2.5. Высокая точность в широком динамическом диапазоне

После определения свойств чувствительных элементов и установления требуемого выходного сигнала проектируется оставшаяся часть электронной интерфейсной системы. В этом разделе системы реализуется соответствующая технология измерения. Проектирование или выбор технологии измерения осуществляются так, чтобы достичь оптимальных характеристик в соответствии с целевой функцией системы. В этой части рассматриваются современные технологии измерения для создания интеллектуальных сенсорных систем, обладающих высокой точностью в широком динамическом диапазоне. Для достижения высокой точности предпринимаются различные меры по уменьшению или устранению разнородных ошибок, что и рассматривается в следующих подразделах.

2.5.1. Систематические, случайные и многоканальные ошибки

С точки зрения точности системы существуют три типа ошибок:

- *случайные ошибки* обусловлены, например, помехами, шумом и дрейфом. Подобные ошибки меняются случайным образом в любой момент времени измерения.

- *систематические ошибки* обусловлены, например, неточностью параметров системы. Эти ошибки характеризуются воспроизводимостью в любой момент времени измерения.
- *многоканальные ошибки* обусловлены, например, отражением импульсных сигналов возбуждения.

Случайные ошибки можно минимизировать за счет применения фильтрации в частотной области, отделяя синфазные и противофазные сигналы, трехсигнального подхода и метода прерывания (разд. 2.5.3 и 2.5.2) и, естественно, оптимизации системы в отношении шумовых характеристик.

Существует несколько способов уменьшения *систематических ошибок*, например, за счет калибровки и настройки. Традиционный процесс калибровки включает сравнение сенсора с другим сенсором более высокого качества во время испытаний. Для точных измерений полученные в ходе испытаний данные сохраняются в памяти компьютера или просто записываются на бумагу и используются во время последующей эксплуатации сенсора. При настройке характеристики сенсора постоянно изменяются до тех пор, пока они не будут максимально близко соответствовать номинальным значениям. Это позволяет отказаться от необходимости записывать индивидуальные характеристики сенсора. Хотя калибровка и настройка — полезные способы повышения точности, они имеют ряд недостатков. В частности, калибровка и настройка производятся при определенных условиях с точки зрения температуры, напряжения и времени питания, которые могут отличаться в реальных условиях эксплуатации сенсора. Кроме того, систематические ошибки могут меняться вследствие изменения условий окружающей среды и долговременного дрейфа параметров. Поэтому лучший способ решения этой проблемы — устранение влияния всех параметров преобразования за исключением тех, которые необходимы для базовых измерений и тех, которые достаточно надежны, стабильны и точны. В разд. 2.5.2–2.5.4 рассматриваются базовые концепции современных технологий устранения систематических ошибок.

Многоканальные ошибки возникают в системах, которые используют импульсы для измерения, например, времени пролета, дистанции, механического движения, расхода, разброса свойств материала и пр. Полезный сигнал, который прошел определенный путь, подвергается возмущающему воздействию со стороны отраженных, проделавших другой путь сигналов. Фильтрация во временной области (создание временных окон) является эффективным методом для селективного обнаружения полезного сигнала. В следующем разделе более подробно рассматривается ряд упомянутых выше технологий.

2.5.2. Улучшенная технология прерывания

Прерывание в комбинации с синхронным детектированием — хороший способ уменьшения влияния низкочастотных помех и шума, в том числе типа $1/f$, смещения, дрейфа смещения, перекрестных влияний главных цепей. Прерыватель можно реализовать с помощью четырех ключей (коммутаторов), которые поочередно подключают соединительные провода источника сигнала с более высокой частотой, чем частота возмущающих сигналов.

В традиционном прерывателе сигнал переключается в последовательности: $+, -, +, - \dots$. После усиления в демодуляторе производится обратная операция. Такой процесс демодуляции преобразует низкочастотный шум и смещение в диапазон сигналов повышенных частот. С помощью фильтра низких частот удаляют высокочастотные сигналы и получают улучшенную версию полезного сигнала. Прерывание можно рассматривать как специальный способ модуляции/демодуляции с синхронным детектированием. Для улучшения характеристик прерывателя переключение сигнала может происходить в последовательности: $+, -, -, +, +, -, -, + \dots$ [10]. Это означает, что после первоначального измерения в каждый момент времени производятся *два* измерения с помощью ключей в одном и том же положении. С точки зрения помех подобная последовательность переключения обеспечивает улучшенный режим фильтрации, что можно пояснить на следующем примере.

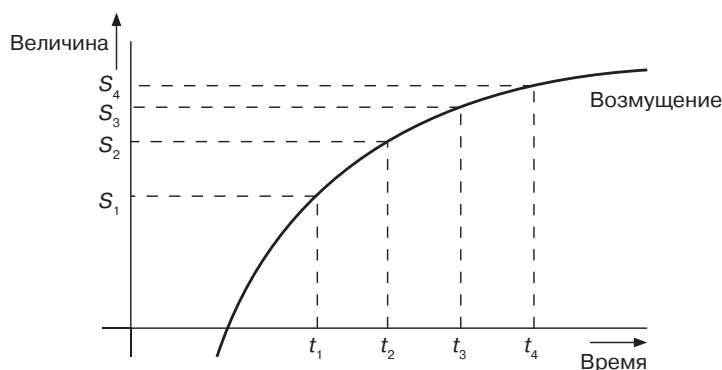


Рис. 2.9. Величина возмущающего сигнала, демодулированного в моменты времени t_i , ($i = 1, 2 \dots$)

Пример 2.1. Рассмотрим рис. 2.9. На нем изображен низкочастотный возмущающий сигнал, накладываемый на сигнал сенсора (на рис. не показан), который необходимо обработать методом прерывания. Демодуляция происходит посредством действий коммутатора в моменты времени ($t = t_i$, $i = 1, 2 \dots$). После демодуляции и низкочастотной фильтрации получается остаточная низкочастотная компонента возмущающего сигнала. В случае традиционного метода прерывания для набора из четырех выборок эта компонента $\epsilon_{\text{трад}}$ определяется как:

$$\epsilon_{\text{трад}} = (S_1 - S_2) + (S_3 - S_4). \quad (2.1)$$

В случае улучшенного метода прерывания остаточная ошибка $\epsilon_{\text{улуч}}$ определяется как:

$$\epsilon_{\text{улуч}} = (S_1 - S_2) - (S_3 - S_4). \quad (2.2)$$

Из рис. 2.9 можно сделать заключение, что $\epsilon_{\text{улуч}} < \epsilon_{\text{трад}}$.

В области z для улучшенной технологии прерывания функция передачи фильтра определяется уравнением:

$$1 - z^{-1} - z^{-2} + z^{-3}, \quad (2.3)$$

где $z = \exp(j\omega T_{\text{мод}})$, $T_{\text{мод}}$ — период модулятора. Уравнение 2.3 можно преобразовать в выражение частотной области, которое свидетельствует о достижении низкочастотной фильтрации второго порядка возмущающего сигнала.

К сожалению, регулирующие сигналы переключателей приводят к появлению новых проблем. Из-за паразитных эффектов переключения (наводки тактовых импульсов и инжекция зарядов в каналах) имеет место остаточное явление даже после фильтрации и демодуляции, которое можно уменьшить за счет оптимизации схемы переключателя и компенсации с помощью противофазного эффекта управления сигналами для n - и p -каналов полевых транзисторов.

На рис. 2.10 приведено общее решение этой проблемы [11]: в так называемой технологии *вложенного прерывателя* применяется дополнительная пара прерывателей, функционирующих при значительно более низкой частоте по сравнению с другой исходной парой. Например, в схеме на рис. 2.10 внутренние коммутаторы функционируют при частоте более высокой, чем $1/f$ частота сопряжения (несколько десятков килогерц), в то время как внешние коммутаторы — при относительно низкой частоте (несколько десятков герц).

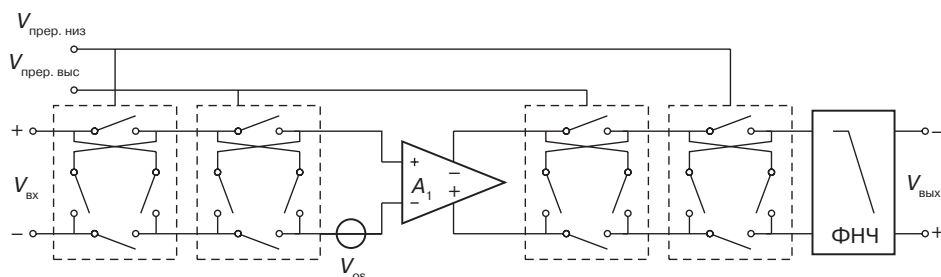


Рис. 2.10. Принципиальная схема усилителя с вложенным прерывателем

Внешние коммутаторы применяются для удаления компоненты постоянного тока в выбросах, вызванных наводками тактовых импульсов. Внешние переключатели также обладают переключающим эффектом, но вследствие существенно более низкой частоты переключения эти влияния незначительны. Такая технология требует применения дополнительного низкочастотного фильтра, который можно легко реализовать в виде цифрового фильтра в программной реализации применяемого контроллера. Введение третьей пары коммутаторов позволяет и дальше развить базовую концепцию вложенного прерывателя. Эта третья коммутаторная пара может функционировать, например, при промежуточной средней частоте, где-то между частотой сопряжения $1/f$ -шума и регулирующей частотой внешнего прерывателя для уменьшения, в частности, помех питающей линии. Технология прерывания не подходит для ослабления влияния систематических

ошибок, вызванных, например, неточностью или дрейфом параметров передачи. Подобный тип ошибок можно устранить, используя автокалибровку.

2.5.3. Автокалибровка

Нежелательные эффекты изменения параметров передачи можно устранить различными способами, например, с помощью автокалибровки [12], во время которой производится измерение достаточного числа эталонных сигналов $E_{\text{эт}}$ аналогичным, как и для сенсорного сигнала E_x , способом. В случае линейной системы достаточно двух эталонных сигналов. Формирователь сигналов преобразует сенсорный сигнал и эталонные сигналы, например, во временную область, используя рассмотренные в разд. 2.4 модуляторы периода. Формирователь сигналов спроектирован таким образом, чтобы обеспечить линейную зависимость между выходным сигналом (период времени T_i) и входным сигналом (измеренный сигнал E_i), удовлетворяющую уравнению:

$$T_i = KE_i + T_{\text{см}}, \quad (2.4)$$

где K — передаточный коэффициент системы, $T_{\text{см}}$ — смещение системы. При так называемом трехсигнальном измерении определение двух эталонных сигналов $E_{\text{эт1}}$ и $E_{\text{эт2}}$ и сенсорного сигнала E_x осуществляется последовательно с формированием трех выходных периодов $T_{\text{эт1}}$, $T_{\text{эт2}}$ и T_x , соответственно. Конечный результат измерения представлен соотношением $M_{\text{кон}}$:

$$M_{\text{кон}} = \frac{T_x - T_{\text{эт1}}}{T_{\text{эт2}} - T_{\text{эт1}}} = \frac{E_x - E_{\text{эт1}}}{E_{\text{эт2}} - E_{\text{эт1}}}. \quad (2.5)$$

Обращаем внимание, что этот конечный результат нечувствителен как к мультипликативному параметру K , так и к аддитивному параметру $T_{\text{см}}$ формирователя сигналов. Важно отметить, что два эталонных сигнала $E_{\text{эт1}}$ и $E_{\text{эт2}}$ должны иметь одинаковую с сенсорным сигналом E_x размерность. Для упрощения эталонный сигнал $E_{\text{эт1}}$ часто принимают равным $E_{\text{эт2}}$ или нулю. В последнем случае уравнение (2.5) упрощается до выражения:

$$M_{\text{кон}} = \frac{T_x - T_{\text{см}}}{T_{\text{эт}} - T_{\text{см}}} = \frac{E_x}{E_{\text{эт}}}. \quad (2.6)$$

Принцип автокалибровки используется во многих сенсорных системах, описанных в этой книге. Бывают случаи, когда полноценное применение такого подхода невозможно из-за сложности системы. Тем не менее, даже частичное использование технологии автокалибровки позволяет существенно уменьшить число параметров системы и улучшить ее характеристики.

Пример 2.2. При измерении температуры T_x практически невозможно производить измерение двух эталонных температур T_1 и T_2 . Поэтому значение температуры можно преобразовать, например, в величину сопротивления (гл. 7). Затем, используя описанный выше трехсигнальный метод, для продолжения обработки сигнала (рис. 2.11) можно использовать два эталонных резистора R_1 и R_2 .

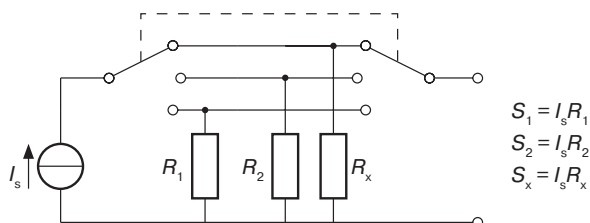


Рис. 2.11. Измерение резистора R_x (четырёхпроводный метод). Для автокалибровки в соответствии с трехсигнальным принципом дополнительно производится измерение двух эталонных резисторов R_1 и R_2

2.5.4. Динамическое усиление

Во время автокалибровки обработка трех и более сигналов осуществляется одним и тем же способом. Система должна быть линейной или хорошо описываться во всем сигнальном диапазоне. Если сигналы не находятся в одном и том же диапазоне значений, это может привести к проблемам. Выше будет показано, что во многих практических решениях необходимо определить соотношение между слабым и сильным сигналами. Это, например, имеет место, если необходимо измерить величину питающего $V_{\text{пит}}$ и выходного $V_{\text{вых}}$ напряжений моста сопротивления для определения его относительного рассогласования $V_{\text{вых}}/V_{\text{пит}}$ (рис. 2.12).

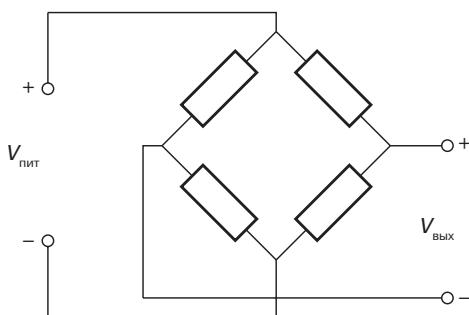


Рис. 2.12. Резистивные чувствительные элементы в конфигурации моста Уитстона

Измерительный усилитель с резистивной динамической обратной связью

Предположим, необходимо усилить слабый сигнал на коэффициент A , так чтобы величина усиленного выходного напряжения моста $AV_{\text{вых}}$ стала примерно равной напряжению питания $V_{\text{пит}}$. В этом случае будет достаточно сложно создать схему, обеспечивающую коэффициент усиления A без снижения точности. Применение усилителя с динамическим элементом согласования (ДЭС) [13, 14] поможет решить такую проблему. Решение продемонстрировано на примере измерительного ДЭС-усилителя с динамической обратной связью (рис. 2.13). Резистивная схема обратной связи состоит из цепочки K согласованных сопротивлений. Цепочка может вращаться, соединяясь с соответствующими ключами (на рисунке показано только шесть). Обратная связь реализуется с помощью u , v , и w резисторов.

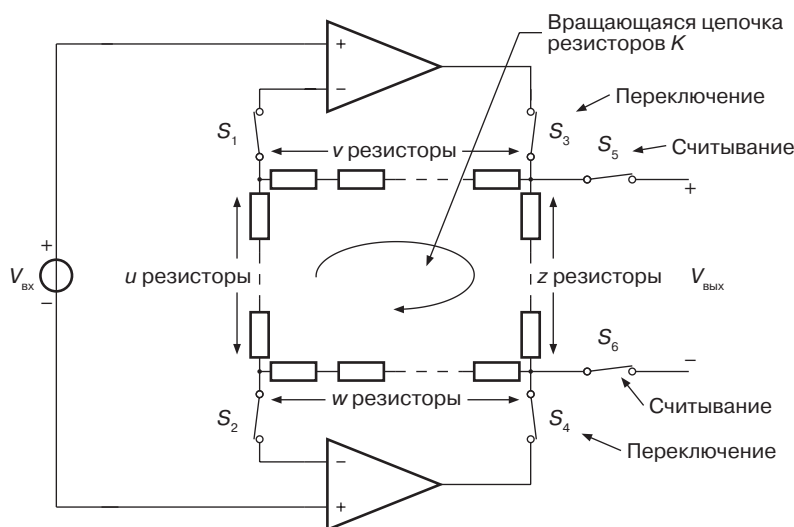


Рис. 2.13. Принцип измерительного усилителя с динамической обратной связью. На рисунке изображено только шесть ключей. Фактически, каждый узел цепочки резисторов подключается через набор из шести ключей со схемой усилителя (De Jong [13])

Завершает формирование цепочки резистивная нагрузка, состоящая из z сопротивлений, так чтобы выполнялось уравнение:

$$K \equiv u + v + w + z. \quad (2.7)$$

Влияние подключенных посредством S_1 – S_6 резисторов полностью устранено за счет применения переключающего и считывающего сигналов. Вращение цепочки резисторов между двумя операционными усилителями формирует динамическую обратную связь. По этой причине сопротивления нагрузки, которые не оказывают влияния на коэффициент усиления, имеют большое значение для обеспечения функциональности динамической обратной связи. Выходное напряжение преобразуется во временную область (на рис. 2.13 не показано). Микроконтроллер обеспечивает дискретизацию и алгоритмическую обработку, а также производит расчет среднего результата последовательных измерений.

Средний коэффициент усиления $\bar{G}$ усилителя для K последовательных состояний определяется уравнением:

$$\bar{G} = 1 + \frac{v+w}{u}. \quad (2.8)$$

Рассогласования между сопротивлениями практически не оказывают влияния на средний коэффициент усиления, поскольку компенсируются при перемещении резисторов вдоль цепочки. Регулирование цепочки резисторов осуществляется с помощью машины цифрового состояния, которая обеспечивает соединение с соответствующими ключами. Каждое последовательное состояние реализуется поворотом цепочки на одну позицию с шаговой частотой около 50 кГц.

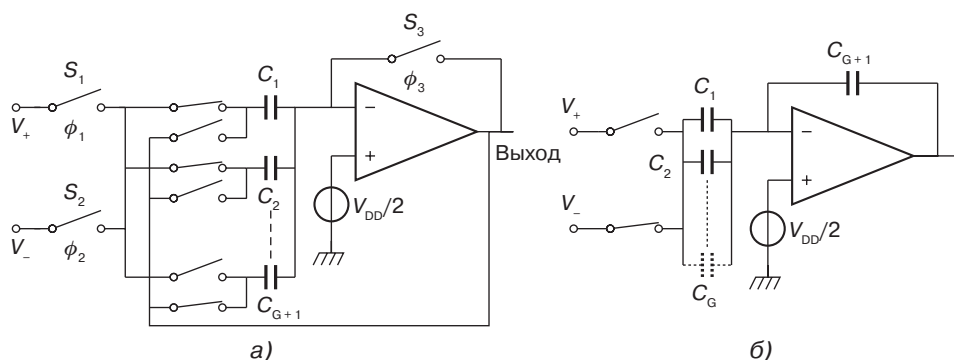


Рис. 2.14. ДЭС-усилитель с подключенными емкостями (а); упрощенное изображение конфигурации обратной связи (б) (Wang [15])

Регулирование цепочки резисторов требует применения шести ключей, каждый из которых соединяется в одной точке между соответствующими двумя резисторами (в общей сложности необходимо шесть K ключей). Выходное напряжение преобразуется во временную область, в которой, например, микроконтроллер осуществляет дискретизацию и алгоритмическую обработку сигнала.

Измерительный усилитель с емкостной динамической обратной связью

Можно сконструировать измерительный усилитель с контуром динамической обратной связи, используя переключаемые конденсаторы [15, 16]. Важная особенность подобного рода усилителя (рис. 2.14а) заключается в том, что входным сигналом можно управлять во всем диапазоне синфазного входного напряжения с размахом, равным напряжению питания. Усилитель с коэффициентом усиления G требует применения $G + 1$ одинаковых конденсаторов. ДЭС-технология реализуется за счет последовательного изменения положения конденсатора в каждом цикле измерения (рис. 2.14б). Во время каждого цикла измерения один из $G + 1$ конденсаторов находится в положении обратной связи C_{G+1} , в то время как остальные — в положении C_1 .

Средняя величина коэффициента усиления за весь цикл $\bar{G}$ определяется уравнением:

$$\bar{G} = \frac{1}{G+1} \sum_{i=1}^{G+1} \frac{\sum_{j=1}^{G+1} C_j - C_i}{C_i} = G + \Delta G, \quad (2.9)$$

где ΔG — остаточная ошибка рассогласования второго порядка. Как и в случае усилителя с резистивной обратной связью, происходит существенное ослабление влияния рассогласования компонентов.

Пример 2.3. Предположим, что $G = 7$ и два из восьми конденсаторов имеют отклонение от номинального значения $+1\%$ и -1% , соответственно. Без применения ДЭС-технологии рассогласование приводит к относительной ошибке усиления, которая, в зависимости от положения конденсатора, может достигать ве-

личины $\pm 1\%$. При использовании ДЭС-технологии аналогичное рассогласование приведет к появлению относительной ошибки усиления 29×10^{-6} .

2.5.5. Динамическое деление и другие динамические технологии обработки сигнала

Как и в случае усиления очень слабых сигналов, можно также уменьшить величину самых сильных сигналов, используя динамический делитель напряжения [17]. На рис. 2.15 показан принцип функционирования делителя, в котором используется комбинированная резистивно-емкостная схема. Делитель реализуется на основе использования N_R резисторов и N_C конденсаторов, что обеспечивает точное соотношение деления $\alpha_d = N_C / N_R$.

В этой схеме необходимо принимать меры предосторожности для минимизации влияния сопротивления открытых МОП-ключей на коэффициент деления. Для резистивной части делителя это достигается с помощью высокоомного входного импеданса усилителя. Для емкостной части делителя — за счет использования дискретизирующей и блокирующей (ДБ) схемы (на рис. 2.15 не показана, рассматривается в гл. 10). Интервал дискретизации ДБ-схемы должен быть достаточно продолжительным, принимая во внимание постоянные времени схемы делителя.

ДЭС-технология требует применения схем обработки сигналов и данных, в частности, дискретных контроллеров, схем памяти и вычислений. Микроконтроллеры вполне пригодны для реализации функций подобных устройств. Дополнительно их можно использовать для обработки данных на уровне системного проектирования, в том числе для усреднения или цифровой фильтрации высшего порядка, нелинейной компенсации, автокалибровки, обнаружения помех, самотестирования и др.

Представленный в следующем разделе случай относится к сенсорным системам, в которых успешно реализована вышеописанная технология.

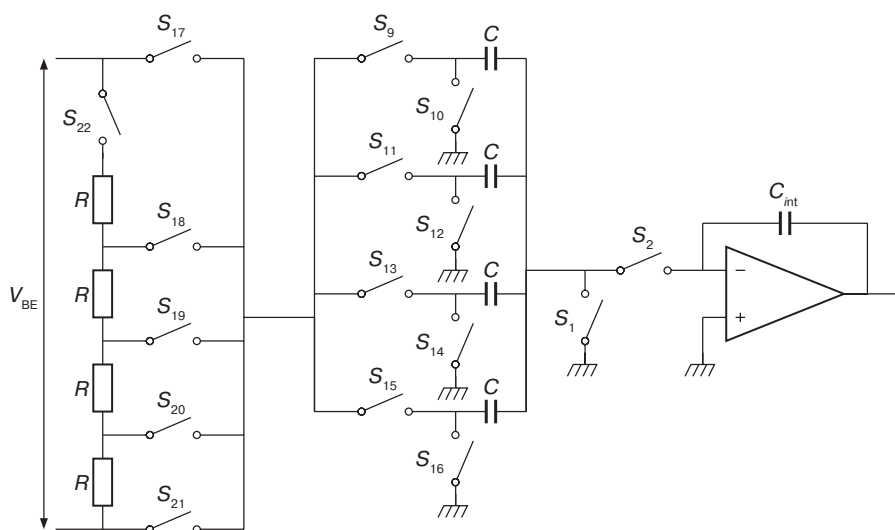


Рис. 2.15. Динамический делитель напряжения (Goes, Meijer [17])

2.6. Универсальный интерфейс преобразователя

В качестве примера в этом разделе рассматривается интерфейсная ИС – универсальный интерфейс преобразователя (УИП) [18], в котором реализовано большинство рассмотренных в данном разделе технологий измерения. На рис. 2.16 представлена система, спроектированная для разнообразных чувствительных элементов на основе ИС УИП.

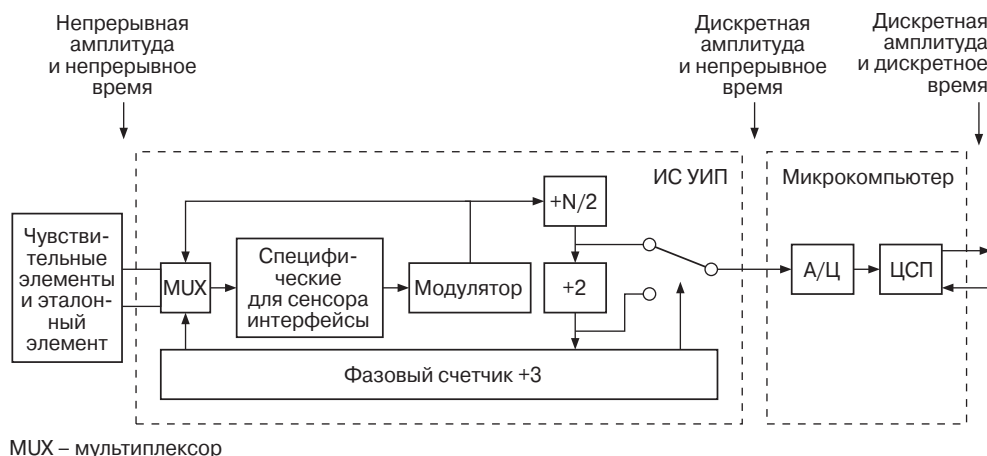
2.6.1. Описание интерфейсной интегральной схемы и прикладная техника измерения

Такая ИС содержит несколько интерфейсных устройств, которые были оптимизированы для часто используемых чувствительных элементов [10]. На рис. 2.17 приведена структурная схема УИП-системы.

Несколько чувствительных элементов, эталонный элемент и в виде опции элемент смещения подключены к входному терминалу ИС УИП. Селектор (мультиплексор) последовательно присоединяет каждый из этих элементов к соответствующему интерфейсу. Регулирование селектора (мультиплексора) осуществляется с помощью фазового счетчика, который отсчитывает три, четыре или пять фаз, как будет рассмотрено ниже в этом разделе.



Рис. 2.16. Изображение системы на основе универсальных интерфейсных преобразователей (G. Wang)



MUX – мультиплексор

Рис. 2.17. Структурная схема УИП-системы

Необходимы, по крайней мере, три фазы для реализации технологии автокалибровки, описанной в разд. 2.5.3. Специфический для соответствующего режима интерфейс подсоединяется к модулятору, который включает релаксационный генератор, создающий выходной сигнал прямоугольной формы, с длиной периода, пропорциональной значению амплитуды сигнала выбранного чувствительного элемента. Сигнал имеет пониженную частоту для облегчения регистрации длины периода в микроконтроллере и уменьшения влияния соединительных проводов и (опционально) ключей между интерфейсной ИС и микроконтроллером. Такой режим реализуется с помощью N -счетчика, который также запускает фазовый счетчик для выбора следующей фазы измерения. Поэтому каждая фаза измерения состоит из N периодов. Во время измерения фазы смещения (интервал времени $T_{см}$ на рис. 2.18) частота выходного сигнала УИП увеличивается в два раза. Это позволяет микроконтроллеру выявить период смещения для последующей его синхронизации с фазовым счетчиком. Как следствие, число периодов в ходе измерения равняется числу фаз плюс один. После трех, четырех или пяти фаз (интервалов времени) осуществляется полный цикл измерения (рис. 2.18).

Выдаваемый модулятором сигнал используется также в качестве возбуждающего для пассивных чувствительных элементов. Это обеспечивает синхронное обнаружение сенсорных сигналов и увеличивает устойчивость в отношении помех. Более того, повышается селективность измеренных параметров в присутствии паразитных компонентов. Эту особенность поясняет рис. 2.19.

Предположим, что сигнал возбуждения прямоугольной формы формирует такой выходной сигнал чувствительного элемента, который из-за наличия паразитных элементов сразу же после изменения 0 – 1 или 1 – 0 характеризуется различными переходными процессами (выбросы, задержка во времени и др.). Используя схему выборки и хранения, можно ослабить влияние переходных процессов. Поскольку управление такой схемой синхронизируется с сигналом возбуждения, можно подождать до конца временного интервала каждого полупериода и для дальнейшей обработки выбрать самое последнее значение.

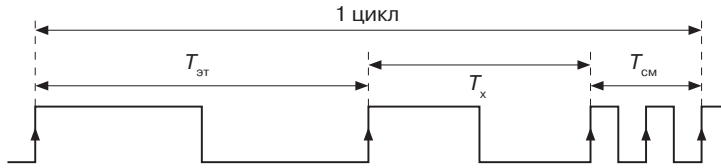


Рис. 2.18. Выходной сигнал интерфейса УИП для случая, когда полный цикл измерения включает три фазы. Три фазы соответствуют трем временным интервалам и четырем периодам

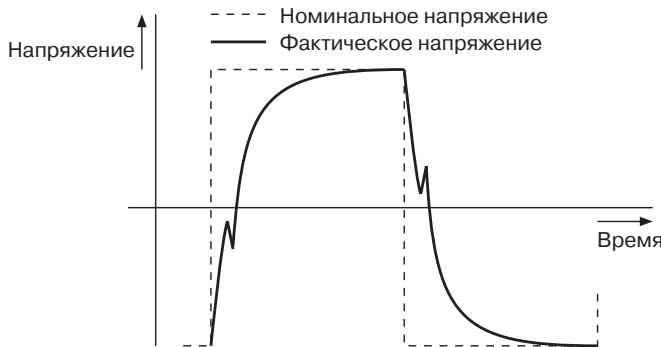


Рис. 2.19. Возможная форма искаженного выходного напряжения интерфейсного усилителя при прямоугольном сигнале возбуждения чувствительного элемента

Фактически, этот подход показывает, каким образом можно добиваться селективности при обработке сигнала во временной области. Наряду с обработкой сигнала в частотной области такая технология полезна для улучшения характеристик схемы и системы в целом. В гл. 10 будут представлены другие примеры обработки сигнала во временной области. Частота выходного сигнала модулятора достигает нескольких десятков кГц. В зависимости от применяемого режима и после деления выходная частота варьируется в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен Гц. Следует подчеркнуть, что деление не оказывает влияния на сигнал возбуждения.

Модулятор и интерфейсная схема для датчиков емкостных типов

Основная часть интерфейса – модулятор. Кратко рассмотрим функционирование модулятора для случая, когда он соединяется с интерфейсной схемой емкостных сенсоров (рис. 2.20) [19]. Приведенная на рис. 2.20 схема используется для определения относительной величины сенсорного конденсатора C_x в сравнении с эталонным $C_{эт}$. Эти конденсаторы имеют один общий электрод, вследствие чего требуется три вывода ИС для их соединения с интерфейсной микросхемой. Для ряда режимов возможно соединение до четырех конденсаторов и одного эталонного, что требует применения ИС с шестью выводами. Эти выводы имеют обозначение: А, В, С, D, Е, F и могут использоваться для других областей применения сенсоров.

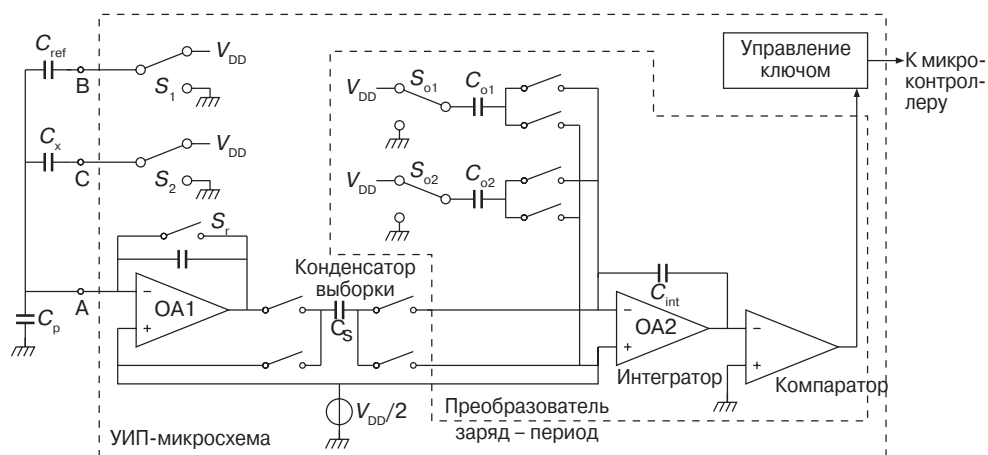


Рис. 2.20. Принцип функционирования системы УИП для режимов на основе применения емкостных сенсоров

Выходной сигнал модулятора управляет ключами S_1 и S_2 таким образом, чтобы генерируемое прямоугольное выходное напряжение определяло выбор конденсатора C_x или $C_{эт}$. Это приводит к формированию прямоугольного выходного напряжения для операционного усилителя $OA1$, функционирующего в линейной области. Амплитуда выходного напряжения пропорциональна величине емкости сенсора C_x или $C_{эт}$. В конце каждого полупериода конденсатор C_s осуществляет дискретизацию величины прямоугольного выходного напряжения интерфейсного усилителя. После этого заряд конденсатора C_s передается на конденсатор интегратора $C_{инт}$. Этот заряд перемещается за счет интегрирующего тока $I_{инт}$. Как только выходное напряжение интегратора превысит эталонное напряжение компаратора, последний переключается в другое состояние, инициируя запуск следующего шага измерения. Результат этого релаксационного процесса — периодический выходной сигнал прямоугольной формы компаратора. Длина периода выходного сигнала линейно зависит от величины емкости сенсора C_x или $C_{эт}$. Для поддержания релаксационного генератора в функциональном состоянии даже при $C_x = C_{эт} = 0$ пФ применяется конденсатор смещения C_{o2} . Другой конденсатор смещения C_{o1} используется для формирования временного интервала дискретизации выходного напряжения $OA1$ с конденсатором C_s [20, 21]. Более подробное описание функционирования этой схемы представлено в работе [19].

Технология трехсигнальной автокалибровки реализована следующим способом. Во время стадии измерения сигнала выбирается конденсатор C_x ; во время опорной фазы — конденсатор $C_{эт}$; ни один из этих двух конденсаторов не выбирается во время стадии смещения.

Измерение емкости осуществляется с помощью применения четырехполосника (см. рис. 2.3б): передающий электрод управляется низкоомным источником напряжения, а принимающий электрод соединяется с виртуальной землей (вывод А интерфейсной микросхемы).

Кроме того, применялась улучшенная технология прерывания, что позволяет получать интерфейсный выходной сигнал достаточно большой интенсивности по

отношению к шуму $1/f$. Это достигается за счет модулирования всех соответствующих электрических сигналов при частоте большей, чем пороговая частота шума $1/f$. Благодаря этим мерам можно применять интерфейсную микросхему, полученную по дешевой КМОП-технологии, без возникновения проблем, связанных с уровнем шума $1/f$ КМОП-транзисторов.

Конденсатор выборки и преобразователь заряд–период (рис. 2.20) интерфейсной микросхемы – основной элемент УИП, который используется во всех режимах. Для измерения других типов чувствительных элементов производится небольшая модификация входной схемы (см. ниже).

Интерфейсная схема для датчиков резистивных типов

Интерфейс, адаптированный к измерению платиновых резисторов, показан на рис. 2.21. Эталонный резистор $R_{\text{эт}}$ подключается последовательно с платиновым резистором R_{pt} . Для устранения перегрузки усилителя интегратора величина резистора $R_{\text{смещ}}$ выбирается такой, чтобы амплитуда напряжения на резисторах R_{pt} и $R_{\text{эт}}$ была меньше, чем 0,5 В для $V_{\text{DD}} = 5$ В. При соответствующем выборе величины $R_{\text{смещ}}$ можно также ограничить ток через R_{pt} и, как следствие, самонагрев этого температурного сенсора (гл. 7, разд. 7.2.4). Измерение напряжений $V_{\text{эт}}$ и V_{x} осуществляется во время опорной и сигнальной фаз. Регистрация этих напряжений производится на основе применения четырехполюсной эквивалентной схемы (см. рис. 2.3а). Ток I_{pt} представляет собой сигнал прямоугольной формы, позволяющий уменьшить низкочастотные наводки. Поскольку амплитуда I_{pt} практически не зависит от R_{pt} , достигаемый уровень разрешения остается почти постоянным во всем диапазоне температур R_{pt} . Микроконтроллер вычисляет температуру платинового резистора на основе табличных значений или решения уравнения.

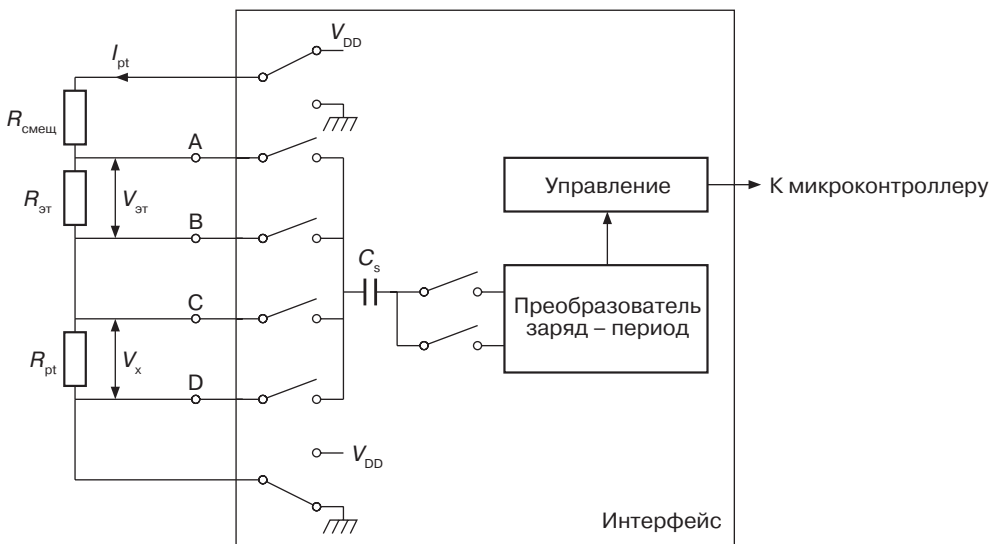


Рис. 2.21. Структура интерфейса для измерения платинового резистора

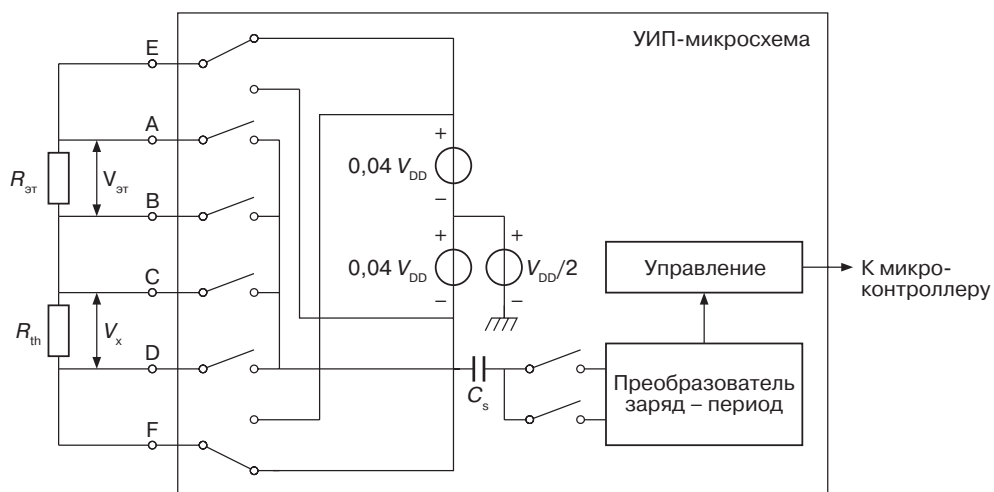


Рис. 2.22. Структура интерфейса для измерения термисторов

Интерфейсная схема для датчиков термисторных типов

Интерфейс, адаптированный для измерения термисторов, показан на рис. 2.22. Эталонный резистор $R_{\text{эт}}$ подключается последовательно с термистором $R_{\text{т}}$. Импульсное напряжение с амплитудой $0,08 V_{\text{DD}}$ питает последовательно подключенные резисторы. Способ управления обеспечивает строгую линейризацию нелинейных характеристик термистора и достаточно постоянный уровень разрешения в широком диапазоне температур в соответствии с методом, рассматриваемым в гл. 7 (рис. 7.11).

Микроконтроллер вычисляет температуру термистора, которая является измеряемым параметром.

Интерфейсная схема для датчиков мостовых типов

Такой интерфейс адаптирован к измерению резистивных мостов, показанных на рис. 2.23. Мост состоит из четырех резисторов $R_{\text{м}}$, по крайней мере, один из которых чувствителен к физическому сигналу, что обеспечивает относительное изменение сопротивления Δ . Возможны два режима для двух диапазонов выходного напряжения моста: в случае больших значений выходного напряжения дискретизация выходного напряжения моста осуществляется посредством четырех подключенных параллельно дискретизирующих конденсаторов $C_s/4$. Если максимальная величина выходного напряжения моста V_x ниже определенного уровня, производится его 15-кратное усиление. Затем с помощью четырех параллельных конденсаторов $C_s/4$ производится его дискретизация. Усилитель обеспечивает очень точный коэффициент усиления за счет применения техники динамического элемента согласования и не требует калибровки (разд. 2.5.3). Во время фазы эталонного измерения напряжение $V_{\text{эт}}$ на диагоналях моста делится на восемь практически равных частей (в соответствии с рассмотренным в разд. 2.5.5 принципом), которые подвергаются дискретизации с помощью одного конденсатора $C_s/4$.

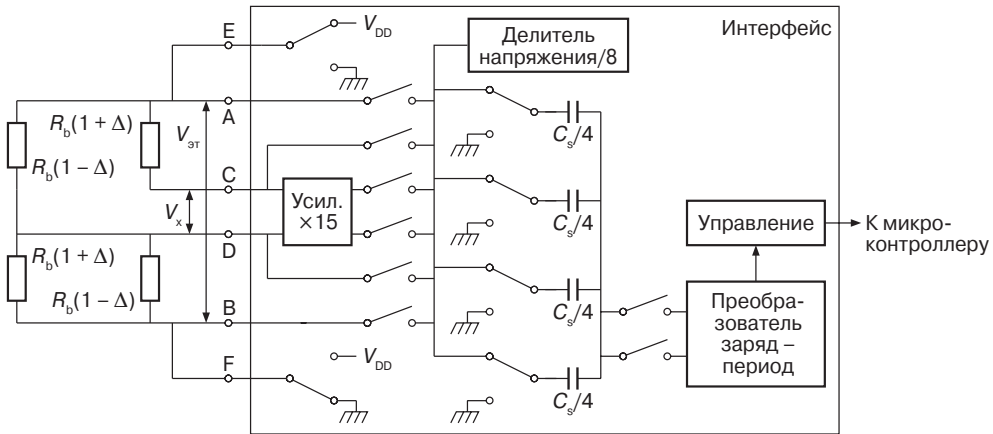


Рис. 2.23. Структура интерфейса для измерения рассогласования резистивного моста

Поэтому реализованный на кристалле делитель напряжения производит эффективное деление $V_{э\tau}$ на 32 части (разд. 2.5.5). Коэффициент деления также характеризуется очень высокой точностью и не требует калибровки. Измерение напряжения осуществляется на основе эквивалентной схемы четырехполюсника (см. рис. 2.3а). Кроме того, применяется также принцип улучшенного прерывания (разд. 2.5.2).

2.6.2. Реализация и экспериментальные результаты

УИП-микросхема реализована на основе 0,7 мкм КМОП-технологии (рис. 2.24). После выбора одного из 16 рабочих режимов [18] такая ИС обеспечивает сопряжение:

- емкостных сенсоров в различных диапазонах от $(0 \div 2)$ пФ до $(0 \div 300)$ пФ;
- одного или множества платиновых резисторов, например, типа Pt100, Pt1000, с внешне регулируемым током смещения;
- термисторов со значением 0°C в диапазоне $1 \div 10$ кОм и обеспечением линейаризации;
- различного рода резистивных мостов в диапазоне $250 \text{ Ом} \div 10 \text{ кОм}$ с максимальным рассогласованием $\pm 4\%$ или $\pm 0,25\%$ при питании током или напряжением;
- потенциометров.

Кроме рабочих режимов интерфейс позволяет реализовать:

- испытательный режим, который используется для проверки нелинейности преобразования сигнал — время в интерфейсе;
- селективный режим для медленного или быстрого измерения. Такой режим устанавливает N периодов в пределах одной фазы измерения, с количеством 256 или 32, соответственно;
- режим пониженного (реализуемого микросхемой) потребления энергии. В режиме пониженного потребления энергии ток уменьшается до очень низкого уровня (1 мкА) и выход интерфейса начинает плавать. Возможно параллельное подсоединение нескольких интерфейсов и соединение выходов в конфигурацию монтажное ИЛИ.

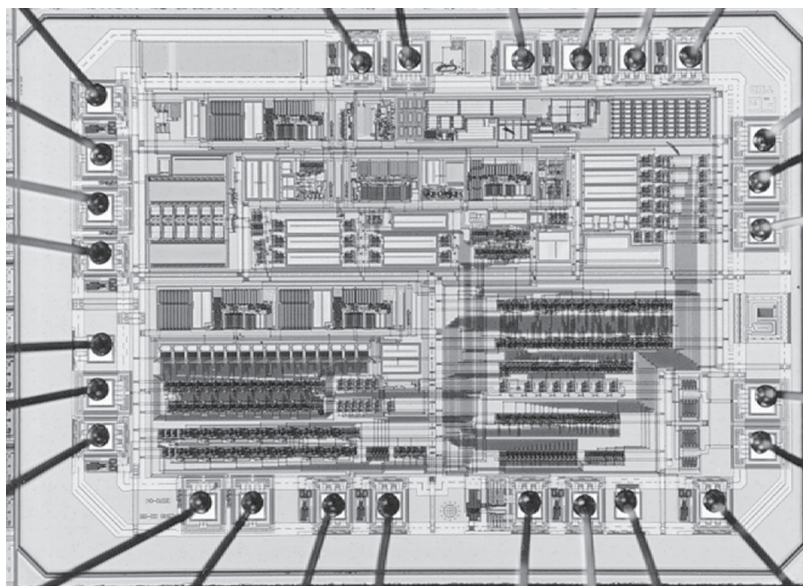


Рис. 2.24. Микрофотография реализованного сенсорного интерфейса. Минимальная длина логического элемента в случае используемой КМОП-технологии – 0,7 мкм. Размер кристалла – 5,5 мм² (Smartec)

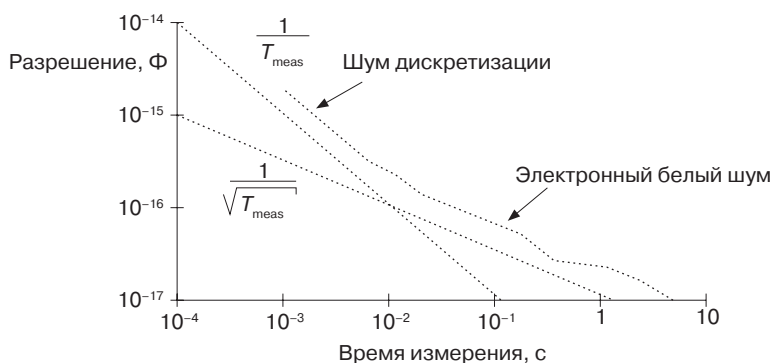


Рис. 2.25. Емкостное разрешение в диапазоне $(0 \div 2)$ пФ относительно времени измерения

Из-за большого числа различных режимов интерфейс можно охарактеризовать, только используя многочисленные результаты измерений. Дополнительную информацию можно получить из работ [18, 19, 21].

На рис. 2.25 приведены кривые разрешений для емкостных сенсоров в диапазоне измерения $0 \div 2$ пФ относительно времени измерения. Для осуществления этого измерения произведено шунтирование внутренних счетчиков периода и фаз внешними, управляемыми самим микроконтроллером. Это дало возможность реализовать временные интервалы измерения в диапазоне 1 мс $\div$ 3 с. Разрешение для коротких интервалов времени обеспечивается, в основном, эффектом кван-

тования. В этом диапазоне разрешение обратно пропорционально времени измерения $T_{\text{изм}}$ (гл. 10). Для более продолжительных временных интервалов электронный шум доминирует и разрешение становится обратно пропорциональным $T_{\text{изм}}^{0,5}$ ($C_p = 30$ пФ) (гл. 10).

Обычно в случае реальной сенсорной системы сенсорные конденсаторы соединяются с интерфейсной микросхемой через экранированный кабель. Паразитная емкость кабеля, которая составляет примерно 100 пФ/м, приводит к созданию паразитной емкости $C_{\text{п}}$ на входе А УИП-микросхемы (см. рис. 2.20). Этот конденсатор оказывает влияние на ряд важных характеристик УИП-системы. На рис. 2.26 приведено измеренное емкостное разрешение в диапазоне $0 \div 2$ пФ относительно паразитной входной емкости $C_{\text{п}}$ на общем электроде (см. рис. 2.20). С увеличением $C_{\text{п}}$ происходит усиление шумового напряжения во входном каскаде и одновременно наблюдается линейное снижение полосы частот. Можно показать, что из-за этих эффектов разрешение пропорционально $C_{\text{п}}^{0,5}$. Этот факт подтверждается результатами измерений, представленными на рис. 2.26, для времени измерения 100 мс. При малых значениях сенсорных емкостей очень трудно проверить абсолютную точность системы. Это, частично, объясняется тем, что для малых величин конденсаторов практически отсутствуют прецизионные компоненты. Даже если такие конденсаторы можно будет изготовить [22], паразитные емкости на интерфейсном входе вносили бы дополнительные ошибки.

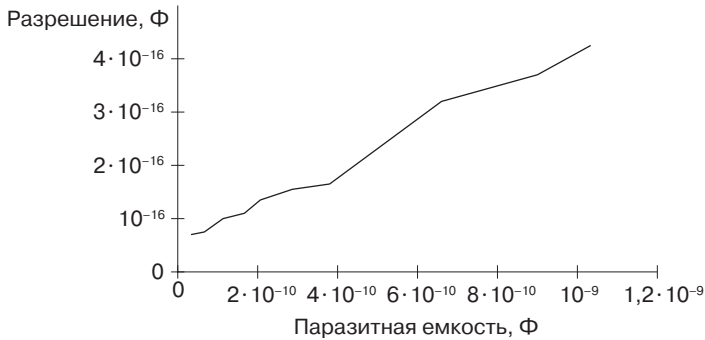


Рис. 2.26. Емкостное разрешение в диапазоне $0 \div 2$ пФ для времени измерения 100 мс относительно паразитной входной емкости $C_{\text{п}}$ на общем электроде

Пример 2.4. Паразитные емкости между выводами интегральной схемы колеблются в диапазоне нескольких десятков пикофард и изменяются от вывода к выводу. Кроме того, соединительные провода также привносят паразитную емкость, которая в значительной степени затрудняет проведение испытания с точностью, соответствующей разрешению, например, 50 аФ (атто — 10^{-18}).

Однако характеристики, которые трудно проверить, редко представляют интерес для пользователя. Напротив, параметры, имеющие большую важность для практического применения, обычно легко проверяются при условии, что приняты необходимые меры. Одна из таких характеристик — нелинейность системы. Даже при малых величинах емкости конденсаторов можно протестировать нели-

нейность системы. Эти испытания с использованием автокалибровки вместо трех включают четыре фазы. Во время этих фаз дополнительно к конденсатору смещения $C_{\text{см}}$ происходит измерение емкости конденсаторов C_1 , C_2 и их суммарной величины $C_1 + C_2$. Чтобы быть уверенным, что во время всего цикла измерения четырех фаз паразитные конденсаторы имеют те же самые величины, положение конденсаторов не должно изменяться во время выборки. Фазы выбираются переключением сигнала возбуждения в положение «включено» или «выключено» без изменения уровня импеданса на любом из выводов конденсатора. Это легко осуществить, используя цифровой мультиплексор [23]. Во время четырех фаз выходной сигнал УИП имеет соответствующие периоды: $T_{\text{см}}$, T_{C1} , T_{C2} и T_{C1+C2} . Нелинейность λ определяется уравнением:

$$\lambda = \frac{T_{C1} + T_{C2} - 2T_{\text{см}}}{T_{C1+C2} - T_{\text{см}}}. \quad (2.10)$$

При идеально линейном преобразовании сигнал – время нелинейность λ равна нулю. Для проведения высокоточных измерений следует применять высококачественные конденсаторы. Для этой цели наилучшим образом подходят тефлоновые конденсаторы, обладающие малой диэлектрической утечкой. На рис. 2.27 показана измеренная нелинейность для тефлоновых конденсаторов с величиной емкости около 1 пФ, соединенных с входными выводами УИП. Во время испытаний на нелинейность моделирование паразитной емкости производилось дискретным конденсатором.

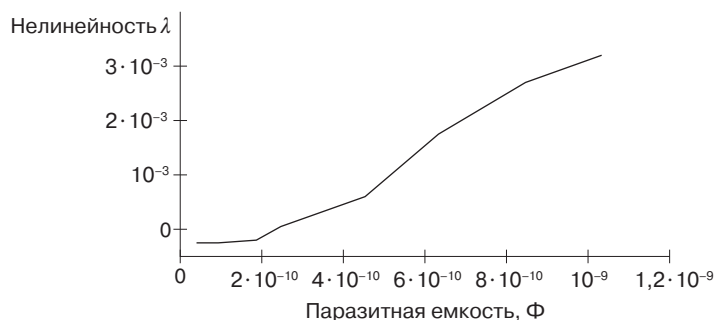


Рис. 2.27. Нелинейность измерения при значении емкости в диапазоне $0 \div 2$ пФ

Дополнительно к результатам эксперимента для емкостных сенсоров в табл. 2.1 приведены обобщенные результаты для некоторых других из 16 режимов применения. Более подробно с экспериментальными результатами, например, в отношении чувствительности к возмущающим сигналам и точности для других режимов применения, можно ознакомиться в работе [19].

В табл. 2.1 диапазон резистивных мостов относится к диапазону выходных напряжений. Для разрешения резистивных температурных сенсоров дополнительно к напряжению термочувствительных резисторов приводится соответствующая ошибка измерения температуры.

Таблица 2.1. Результаты измерения для некоторых из 16 режимов применения

Режим применения	Разрешение в медленном режиме	Разрешение в быстром режиме	Точность в медленном режиме	Условия
Конденсаторы в диапазоне $0 \div 2$ пФ	50 аФ (атто – 10^{-18})	150 аФ	14 бит	$C_n = 30$ пФ
Конденсаторы в диапазоне $0 \div 12$ пФ	0,3 фФ (фемто – 10^{-15})	0,9 фФ	14 бит	$C_n = 30$ пФ
Платиновые резисторы	7 мкВ или 9 м °K	20 мкВ или 26 м °K	15 бит	Pt100, $I_{pt} = 2$ мА
Термисторы	7 мкВ или 1 м° K	20 мкВ или 3 м °K	15 бит	$R_t = 1$ кОм, 4%/°K
Резистивный мост, диапазон 200 мВ	7 мкВ	20 мкВ	11 бит	
Резистивный мост, диапазон 12 мВ	700 нВ	2 мкВ	10 бит	

2.7. Обобщение и перспективные тенденции

2.7.1. Обобщение

Для рассмотренных в этой главе интеллектуальных сенсорных систем представлены технологии измерения, которые можно реализовать с помощью ограниченных по числу недорогих энергосберегающих интегральных схем. Применяемые технологии обеспечивают селективное обнаружение измеряемых параметров с высокой стойкостью к паразитным эффектам чувствительных элементов и соединительных проводов. Применение технологий синхронного детектирования, автокалибровки и улучшенного прерывания позволяет добиваться высокой точности и стойкости к возмущающим сигналам, шуму $1/f$ и дрейфу параметров. Представлены технологии увеличения динамического диапазона сенсорных сигналов, которые предусматривают использование динамических усилителей и делителей.

В качестве конкретного примера рассматривалось применение технологий измерения в сенсорных интерфейсах общего назначения. Такой интерфейс спроектирован для емкостных сенсоров, платиновых резисторов, термисторов, резистивных мостов и потенциометров. Совместно с микроконтроллерами интерфейсная микросхема обеспечивает быстрое и легкое типовое проектирование сенсорных систем. Реализованные концепции измерения включают трехсигнальную технологию (технология непрерывной автокалибровки, которая ограничивает смещение и ошибки усиления интерфейсной микросхемы), не прямое А/Ц-преобразование на основе использования генератора первого порядка, динамическое деление напряжения, согласование с динамическим элементом, улучшенное прерывание, синхронное детектирование и четырехполюсное измерение. Реализована интерфейсная микросхема на основе использования КМОП-технологии с проектной нормой 0,7 мкм. Благодаря этим технологиям измерения удалось ограничить влияние традиционных возмущающих факторов КМОП-схем, в частности шума $1/f$, рассогласования компонентов. Точность системы находится в диапазоне $10 \div 15$ бит с разрешением до 16 бит. Время измерения — в диапазоне $1 \div 100$ мс. Калибровка электронной части не требуется.

2.7.2. Перспективные тенденции

Технологические разработки в области проектирования схем смешанного типа являются движущим фактором развития интерфейсной электроники и технологий измерения. Особенность КМОП-технологии состоит в том, что возможно осуществлять совместную обработку аналогового и цифрового сигналов на одном кристалле. Наличие внутрипроцессорной памяти позволяет обрабатывать данные внутри ИС, что делает интерфейсную электронику еще более интеллектуально насыщенной, снижает интенсивность потока данных и расход энергии. Стандартизация выходных сигналов сенсоров и сенсорных интерфейсов будет способствовать быстрому системному развитию. Разработка универсальных сенсорных интерфейсов с интерфейсной схмотехникой для большого разнообразия чувствительных элементов даст толчок развитию новых сенсорных систем и поможет проектировщикам реализовать надежные и качественные технологии измерения.

Кроме характеристик, имеющих отношение к скорости и точности сенсорных систем, существенной представляется задача обеспечения их надежности. Использование концепции многосенсорных систем дает возможность целенаправленно повышать их надежность. Например, надежность сенсорной системы для измерения температуры с помощью термопары можно в значительной степени улучшить за счет мониторинга ее сопротивления: увеличение сопротивления является сигналом для замены термопары.

Высокоскоростная обработка потока данных сенсора в режиме реального времени ставит новые задачи для будущих разработок. Перспективные сенсорные системы должны иметь возможность адаптироваться путем оптимизации своих характеристик в режиме реального времени в зависимости от конкретных условий эксплуатации. Подобная адаптация возможна только в случае обработки данных сенсора в таких же условиях. Тогда происходит слияние процессов обработки сигнала и данных. Проектировщики, исповедующие метод «обучения у природы», будут разрабатывать сенсорные системы, все больше и больше напоминающие сенсорные системы животных и человека с искусственными органами зрения и слуха, с адаптацией к конкретным условиям эксплуатации, а также совместно функционирующие сенсоры и мускулы с реакцией на сигналы, генерируемые центральным процессором. Подобные сенсорные системы можно разрабатывать только на основании обобщенного подхода проектирования, когда специалисты в области программного и аппаратного обеспечения работают в тесном сотрудничестве для достижения общей цели.

Задачи

2.1. ВЛИЯНИЕ КАБЕЛЕЙ И ПРОВОДНИКОВ, СОЕДИНЯЮЩИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ (разд. 2.3.2)

- (а) Сенсорный конденсатор $C_c = 1$ пФ соединяется с входным усилителем микросхемы сенсор–интерфейс в соответствии с принципиальной схемой (рис. 2.28а). Каждый из двух экранированных кабелей имеет длину 1 м и паразитную емкость 100 пФ/м. Напряжение возбуждения $V_{\text{воз}}$ представляет собой сигнал прямоугольной формы с полной амплитудой $V_{\text{па}} = 10$ В.

Усилитель работает в активной (линейной) области (схемы смещения на принципиальной диаграмме не показаны) и его можно рассматривать как идеальный с бесконечными значениями коэффициента усиления и полосы пропускания. Вопрос: какова форма и величина выходного напряжения усилителя V_B ?

- (б) В ряде областей применения сенсорные конденсаторы имеют заземление, поэтому для внешнего соединения доступным является только один вывод. В этих случаях схема приобретает вид, представленный на рис. 2.28б. Напряжение возбуждения аналогично приведенному выше. Вопрос: какова форма и величина выходного напряжения усилителя V_B для этой модифицированной конфигурации схемы?

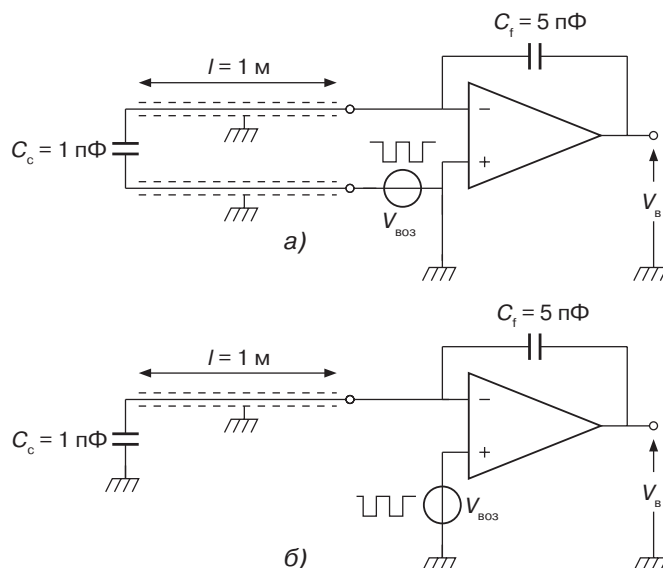


Рис. 2.28. Влияние соединительных кабелей для емкостных сенсоров: с двухпроводным соединением (а); с однопроводным соединением (б)

2.2. ПАРАЗИТНЫЕ РЕЗИСТОРЫ, ШУНТИРУЮЩИЕ ЕМКОСТНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ВЛАЖНОСТИ (разд. 2.3.3)

Емкостной сенсор влажности с сенсорной емкостью C_c и сопротивлением утечки $R_{ут}$ (рис. 2.29а) соединяется с входным контуром структуры сенсор–интерфейс в соответствии с принципиальной схемой (рис. 2.29б). Напряжение возбуждения $V_{воз}$ представляет собой сигнал прямоугольной формы с полной амплитудой $V_{па} = 1$ В и частотой 50 кГц. Усилитель работает в активной области и может рассматриваться как идеальный с бесконечными значениями коэффициента усиления и полосы пропускания. Форма выходного напряжения усилителя V_B показана на рис. 2.29в.

Вопросы:

- (а) Влияние шунтирующего резистора выражается в увеличении напряжения V_0 (см. рис. 2.29а). Определить с помощью расчетов величину роста напряжения.

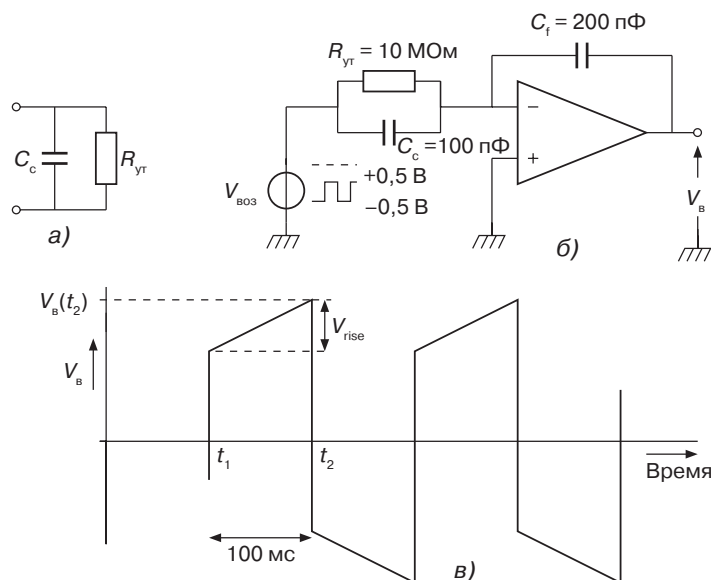


Рис. 2.29. Влияние сопротивления утечки емкостного сенсора влажности: эквивалентная схема чувствительного элемента (а); принципиальная схема входного усилителя (б); выходное напряжение $V_B(t)$ (в)

- (б) Дискретизация выходного напряжения V_B производится в конце каждого полупериода непосредственно перед следующим преобразованием. При $t = t_2$ его величина составляет $V_B(t_2)$. Рассчитать относительную ошибку для этого примера по сравнению с идеальной величиной $V_{B, \text{идеал}}$ для случая, если $R_{\text{ут}} \rightarrow \infty$.

2.3. ПОСТОЯННЫЕ ВРЕМЕНИ ПРЕРЫВАНИЯ ДЛЯ ВЫСОКООМНОГО ГЕНЕРАТОРА НАПЯЖЕНИЯ СЕНСОРА (разд. 2.3.3 и 2.5.2)

Термоэлектрический сенсор с внутренним сопротивлением $R_c = 50 \text{ кОм}$ генерирует выходное напряжение постоянного тока V_c . Прерывание этого напряжения осуществляется с помощью ключа S_1 , который функционирует при частоте $f = 50 \text{ кГц}$ (рис. 2.30а). Входная емкость $C_{\text{в}} = 20 \text{ пФ}$ входного усилителя (на рисунке не показан) вызывает отклонение выходного напряжения $V_{\text{пр}}$ от идеального $V_{\text{пр, идеал}}$. Оба напряжения изображены на рис. 2.30б. Дискретизация напряжения $V_{\text{пр}}$ производится в конце каждого полупериода непосредственно перед следующим преобразованием. Рассчитать относительную ошибку $\Delta V_{\text{пр}}/V_{\text{пр}}$ отсчетов напряжения.

2.4. ДИНАМИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ С РЕЗИСТИВНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ (разд. 2.5.4)

Усилитель с динамической обратной связью (см. рис. 2.13) содержит на выходе z резисторы. Эти резисторы не принимают участия в усилении, но потребляют энергию. Вопрос: для чего они нужны?

2.5. ДИНАМИЧЕСКОЕ УСИЛЕНИЕ С ЕМКОСТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ (разд. 2.5.4)

В схеме на рис. 2.14а ключ S_3 можно найти в контуре обратной связи усилителя. Вопрос: для чего нужен этот ключ?

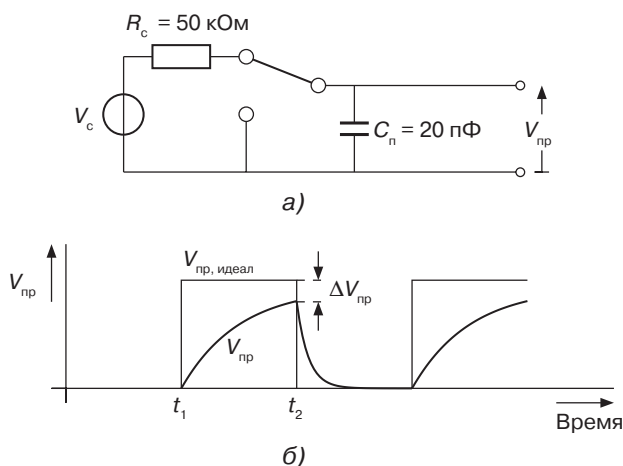


Рис. 2.30. Прерывание для термоэлектрического сенсора: принципиальная схема (а); выходное напряжение $V_{пр}(t)$ (б)

Литература

1. IEEE (1997). *IEEE Std 1451.2, Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators – Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats*, IEEE, New Jersey, USA.
2. Toth, F.N. (1997). A design methodology for low-cost high performance capacitive sensors, PhD Thesis, TU Delft.
3. Smartec (2006-1). www.smartec.nl, Data sheet of Temperature sensors.
4. Li, X. and Meijer, G.C.M. (2000). Elimination of shunting conductance effects in a low-cost capacitive-sensor interface, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **49**, 531.
5. Li, X. and Meijer, G.C.M. (2002). An accurate interface for capacitive sensors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **51**, 935.
6. Nihtianov, S.N., Shterev, G.P., Iliev, B. and Meijer, G.C.M. (2001). An interface circuit for R-C impedance sensors with a relaxation oscillator, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **50**, 1563.
7. Jespers, P.G.A. (2001). *Integrated Converters*, Oxford University Press, Oxford.
8. Gasulla, M., Li, X. and Meijer, G.C.M. (2005). The noise performance of a high-speed capacitive-sensor interface based on a relaxation oscillator and a fast counter, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **54**, 935–939.
9. Van Der Goes, F.M.L. and Meijer, G.C.M. (1996b). Sigma-delta versus oscillator-based converters in low-cost accurate sensor systems. In *IEEE IMTC'96, Brussels*.
10. Van Der Goes, F.M.L. and Meijer, G.C.M. (1997). A universal transducer interface for capacitive and resistive sensor elements, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, **14**, 249–260.
11. Bakker, A., Thiele, K. and Huijsing, J.H. (2000). A CMOS nested-chopper instrumentation amplifier with 100-nV offset, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, **35**, 1877–1883.
12. Meijer, G.C.M. and van Herwaarden, A.W. (1994). *Thermal Sensors*, IOP, Bristol, UK.
13. de Jong, P.C. (1996). Dutch Patent application, 1002732.
14. de Jong, P.C., Meijer, G.C.M. and van Roermund, A.H.M. (1998). A 300 °C dynamic-feedback instrumentation amplifier, *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, **33**, 1999.

15. Wang, G. (2000). Dutch Patent Application, 1014551.
16. Wang, G. and Meijer, G.C.M. (2000). Accurate DEM SC amplification of small differential-voltage signal with CM level from ground to VDD. In SPIE2000, Newport Beach, USA.
17. Van Der Goes, F.M.L. and Meijer, G.C.M. (1994). A simple and accurate dynamic voltage divider for resistive bridge transducers. In IEEE IMTC/94, Hamamatsu, Japan.
18. Smartec (2000-2). www.smartec.nl, Data sheet Universal Transducer Interface UTI.
19. Van Der Goes, F.M.L. (1996). Low-cost smart sensor interfacing, Ph. D Thesis, TU Delft.
20. Van Der Goes, F.M.L. and Meijer, G.C.M. (1996a). A novel low-cost capacitive-sensor interface, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **45**, 536–540.
21. Smartec (2004-2). Interface UTI.
22. Toth, F.N., Bertels, D. and Meijer, G.C.M. (1996). A low-cost, stable reference capacitor for capacitive sensor systems, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **45**, 526.
23. Toth, F.N. and Meijer, G.C.M. (1992). A low-cost, smart capacitive position sensor, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **41**, 1041.