

ЭЛЕКТРОНИКА, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА • ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.317

В. Г. ГУСЕВ, Т. В. МИРИНА, А. Ю. ДЕМИН

МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ

Рассмотрены наиболее общие вопросы проектирования высокостабильных контактных сенсорных устройств. Предложены пути решения проблем, возникающих при взаимодействии электродов и исследуемого объекта. *Первичный измерительный преобразователь ; сенсор ; измерительный электрод*

ВВЕДЕНИЕ

Сенсорными устройствами или первичными измерительными преобразователями называют те технические средства, которые обеспечивают появление на их выходе сигнала, адекватного свойствам объекта, который оценивается. Для получения этого информационного сигнала необходимо обеспечить взаимодействие между сенсором и оцениваемым объектом. Оно может иметь самые различные формы, но присутствовать должно всегда. Без взаимодействия на том или ином уровне информацию об объекте, его свойствах и параметрах получить нельзя, даже при использовании оптических и электромагнитных методов получения информации.

В процессе взаимодействия состояния объекта и сенсора изменяются в той или иной степени. Если состояние объекта изменяется незначительно, то при таком взаимодействии можно однозначно получить информацию о свойствах и параметрах объекта. Эта информация обычно бывает однозначной и хорошо воспроизводимой и может иметь количественные оценки, характеризующие объект измерения. Ее обычно называют измерительной информацией, так как получаемый сигнал тем или иным способом сравнивается с величиной, взятой за меру этого параметра.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

При значительном изменении состояния объекта в результате взаимодействия с сенсором можно оценивать только те параметры и свойства, которые характеризуют объект в новом видоизмененном состоянии. В этом случае говорить об измерениях параметров объекта не

очень корректно, потому что полученные сигналы будут характеризовать его новое состояние.

Из вышесказанного следует мировоззренческий вывод о том, что получить точную информацию о состоянии объекта, его параметрах и свойствах с помощью любых сенсоров нельзя. Можно установить только те свойства и параметры, которые будут у объекта при его взаимодействии с конкретным сенсором.

Наиболее общим свойством всех физических тел, которое характеризует их состояние, является энергия. Виды ее разнообразны и исследованы в соответствующих областях естественных наук. Поэтому взаимодействие объекта и сенсора необходимо рассматривать на энергетическом уровне.

Одним из фундаментальных положений, касающихся взаимодействия тел, является выравнивание их энергий в месте взаимодействия. Так, например, при контакте двух проводников с разными внутренними энергиями в месте их соединения появляется разность потенциалов, которая выравнивает энергии тел и исключает движение зарядов через место контакта, обусловленное разными энергиями взаимодействующих тел. При помещении электрода в жидкость выравнивание происходит вследствие появления двойного электрического слоя, который рассматривается как источник ЭДС. При контакте полупроводников выравнивание энергий обеспечивается *p-n*-переходом с соответствующими электрическими свойствами. Длительное неравенство энергий двух тел (объекта и сенсора) существовать не может. Идут физико-химические процессы, которые обеспечивают быстрое или медленное выравнивание энергий с соответствующим изменением свойств, параметров и характеристик контактирующих тел. В

зависимости от степени подвижности элементов, обладающих энергиями, изменения происходят или в ограниченной зоне вблизи контакта, или захватывают соответствующие объемы объектов. Чувствительность сенсора зависит от того, как сильно меняется его внутренняя энергия в результате взаимодействия. Влияние сенсора на объект тем слабее, чем меньше при взаимодействии меняется внутренняя энергия объекта.

В этих рассуждениях мы опираемся на признанное в физике положение о термодинамическом равновесии тел, длительное время находящихся в контакте и не испытывающих внешних энергетических воздействий.

Таким образом, при построении любых сенсорных устройств невозможно избежать их взаимодействия с исследуемым объектом. При взаимодействии изменяются свойства обоих взаимодействующих тел, и идет выравнивание их энергий. Состояние объекта оценивают или по параметрам тех процессов, которые идут в сенсоре в процессе выравнивания энергий, или по результатам изменений параметров сенсора, происшедших в результате выравнивания энергий. Следовательно, чувствительность сенсорного устройства зависит от разности энергий у взаимодействующих тел.

2. ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СЕНСОРНЫХ УСТРОЙСТВ И ПРЕДЛАГАЕМЫЕ ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод, что если необходимо получить объективную и воспроизводимую информацию о состоянии и свойствах физического тела, то сенсор, с помощью которого это будет осуществляться, должен иметь постоянное и точное значение энергии, которая участвует в процессе взаимодействия. При известности энергии, воздействующей на объект, можно однозначно оценить его свойства и состояние.

Для частного случая будет справедливо утверждение о том, что для получения информации о параметрах и свойствах сложного объекта сенсорное устройство должно обеспечивать постоянство мощности, воздействующей на него. Оно следует из сделанных общих умозаключений.

Если один из взаимодействующих объектов содержит частицы, несущие энергию, которые могут относительно легко менять свое положение в течение конечного времени, то в процессе получения информации будут меняться не толь-

ко свойства узкой зоны, прилегающей к месту контакта тел, но и параметры объема, в котором содержатся подвижные частицы. При этом будут меняться и свойства места раздела контактирующих тел из-за изменений физико-химических свойств зон контакта, вследствие процессов восстановления и окисления. Соответственно, сигнал сенсора будет более переменным и в худшей степени будет отражать свойства исходного исследуемого объекта. Примером таких случаев является оценка разности потенциалов на кожном покрове человека с помощью накладных металлических электродов. Несмотря на все ухищрения и попытки выполнить их малополяризующимися (хлорсеребряные электроды) и расположение их в определенных местах на теле человека при мониторинге сердечной деятельности (холтеровское мониторирование), получение достоверной информации в течение времени, большем 24–48 часов, затруднительно. При использовании многочисленных ионообменных, модифицированных и микроэлектродов проблема стабильности и воспроизводимости информации стоит достаточно остро, так как процессы выравнивания энергии взаимодействующих тел обычно идут с изменениями физико-химических свойств зоны контакта. Поэтому нормирование точностных свойств сенсоров, применяемых в электрохимии, затруднительно. Часто достоверность сигналов, даваемых ими, сохраняется только в течение конечного времени, оцениваемого неделями, месяцами, из-за происходящих в них физико-химических превращений. Как представляется сейчас, физико-химические изменения отражают внутренние процессы взаимодействий, направленных на получение у тела минимальной внутренней энергии. В этом проявляется одно из фундаментальных свойств любой материи. Она стремится принять ту форму или то состояние, в котором ее внутренняя энергия минимальна.

Напрашивается не очень радостный вывод о том, что возможности всех технологических ухищрений по получению информации о свойствах сред, содержащих подвижные носители внутренней энергии, ограничены из-за действия фундаментальных законов материального мира. Это подтверждается сравнительно медленным развитием в области использования потенциометрических методов оценки состава жидкостей.

Перспективным путем проектирования сенсоров, по нашему мнению, является реверс взаимодействующей энергии, так чтобы ее

среднее значение стремилось к нулю. Это стабилизирует процессы взаимодействий даже для тех случаев, когда частицы, несущие энергию, достаточно подвижны, и обеспечит нулевой уровень обмена энергиями за единицу времени. Но технически выполнить операцию реверса энергий очень непросто.

Концептуально понятно, что если временное изменение сигналов сенсора происходит вследствие энергетических взаимодействий, то интегральное значение взаимодействий желательно получить нулевым. Тогда характеристики сенсора будут иметь хорошую временную стабильность, и свойства объекта и сенсора будут оставаться неизменными в течение времени.

Осмыслим реализацию этих умозаключений для электродов, с помощью которых при мониторинге кожного покрова снимается разность потенциалов, характеризующая работу сердца. В этом случае электроды обмениваются энергией с жидкостями, находящимися в кожном покрове. Физико-химические свойства их меняются адекватно работе сердца. Соответственно меняются параметры обмена энергий между ними и электродом, что проявляется в форме изменения потенциала электрода. Исследователями оценивается этот потенциал относительно зоны, в которой процесс взаимодействия между кожным покровом и вторым электродом мало зависит от колебаний сердца. Большая разность потенциалов каждого из электродов характеризует большую разность энергий у взаимодействующих тел и большую интенсивность идущих процессов. Для реверса энергий взаимодействия следует запомнить кривую изменений потенциала электрода и подать на электроды напряжение противоположной полярности, которое в общем случае зеркально симметрично относительно запомненной кривой изменения напряжения. Таким образом будут восстановлены те энергетические условия, с которых началось взаимодействие электрода и объекта. Причем циклы получения информации и восстановления нулевого значения интегрального взаимодействия энергий следует проводить с той скоростью, пока обратимы процессы взаимодействий энергий. Взаимодействие металлических электродов с кожным покровом человека, видимо, идет по следующей схеме. При установке электрода гидрофильные свойства участка кожи под электродом изменяются вследствие нарушения динамического равновесия, существовавшего между этим участком кожи и окружающей средой. Это выражается в том, что участок под электродом становится

более влажным и его электрические свойства изменяются. Между энергетическими параметрами жидкостей тела (кровь, межклеточная жидкость, лимфа) существует динамическое равновесие. Металлический электрод вносит дополнительные возмущения в это состояние. Разные энергетические свойства у электрода и у контактирующей с ним жидкости приведет к появлению двойного электрического слоя, который выравнивает разницу энергий у контактирующих слоев. Временные изменения свойств у слоя жидкости, находящегося в контакте с металлическим электродом, приводят к изменению потенциала между ним и жидкостью. Это одна из видимых причин появления разности потенциалов у электрохимического полужеленита, состоящего из электрода и жидкости. Чем интенсивнее движение жидкости в контактирующем с электродом слое, тем больше значение микротока, необходимого для выравнивания энергий. Интенсивность движения зависит от трения между поверхностью электрода и жидкостью. Оно, в том числе, зависит от качества поверхности электрода, находящегося в непосредственном контакте. Если поверхность имеет малую шероховатость и относится к числу идеально гладких, то поверхностное трение между электродом и жидкостью будет минимальным. Частицы с соответствующими электрическими свойствами не будут застывать около электрода и электрические токи, сопровождающие процесс выравнивания энергий и его потенциал, будут меняться сравнительно быстро. Наверное, это обстоятельство является существенным для уровня шумов электрода. Чем меньше трение между электродом и жидкостью, тем слабее торможение движения частиц, энергии которых выравниваются при взаимодействии с электродом, и вариабельнее результаты взаимодействия. Соответственно, тем больше уровень шумов у электрода.

Если поверхность содержит небольшие микрополости, то движение частиц, несущих энергии, будет затруднено. Они будут застывать в этих микрополостях, что способствует большей стабильности процесса взаимодействия и уменьшению уровня шумов у электрода, связанных с движением микрочастиц, участвующих во взаимодействии. Поэтому если хотят получить интегральное, стабильное представление о свойствах жидкости, участвующей во взаимодействиях, поверхность контактирующего электрода должна быть пористой. Имеются в виду микропоры, затрудняющие микродвижения жидкости. Если необходимо оценивать

микродвижения, характеризующие кинетические процессы, то поверхность контактирующего электрода должна иметь минимальную шероховатость, т. е. быть хорошо полированной. С появлением нанотехнологий, вероятно, станет возможным изготовление малошумящих электродов с оптимальной формой микропор. При этом следует учитывать, что микропоры будут увеличивать инерционность электродов из-за того, что свойства контактирующих тел будут меняться медленнее из-за застойных явлений в микропорах. Так что в общем случае, чем больше быстродействие электродов, тем больше уровень их собственных шумов. В этом плане представляются перспективными электроды из пористой керамики, внутренние микропоры у которой металлизированы. На практике на металлическом электроде можно нанести требуемый рельеф из диэлектрика. Здесь будет целесообразным использование технологий микроэлектроники. С помощью их можно реализовать электроды, имеющие оптимизированные быстродействие и уровень шумов за счет соответствующих размеров микропор и их глубины. Чем больше площадь электрода, тем сильнее будут усредняться одновременно происходящие энергетические взаимодействия, и при прочих равных условиях, меньше уровень шумов электрода.

В простейшем случае, при использовании электродов, находящихся на кожном покрове или находящихся в жидкости, процесс получения нулевых интегральных значений взаимодействующих энергий можно обеспечить следующим образом. Потенциал электрода фиксируется с помощью устройства выборки хранения в течение того промежутка времени, пока он квазипостоянен. Затем электрод отключается от измерительной цепи и к нему подключается напряжение противоположной полярности, которое ровно в два раза больше того, что было на электроде. Процесс обмена энергиями между электродами и жидкой средой пойдет в другую сторону. При равенстве времени такого воздействия временному отрезку, в течение которого фиксировался потенциал, интегральная энергия взаимодействий, имеющих разную полярность напряжения, будет стремиться к нулю. Это реальный путь снижения влияния поляризационных явлений, являющихся камнем преткновения для приборов и систем длительного мониторинга живых организмов и физико-химических систем. Длительности циклов получения информации и приложения энергии, компенсирующей происшедшие энергетические

процессы, зависят от скорости прихода к электродам ионов электролита, создающих информационный сигнал. Так как это случайный процесс, то априори желательно, чтобы длительности циклов были бы минимальными. Но тут возникают ограничения, обусловленные качеством электронных ключей и выбросами напряжений и токов, появляющихся при коммутации. Имеются проблемы с реализацией качественных устройств, которые запоминают информационный сигнал, с помощью которого формируется уравнивающаяся энергия.

Возможен и другой путь обнуления энергий взаимодействующих тел. К ним подключается источник электрической мощности, полярность напряжения которого периодически изменяется на противоположную, причем интегральное значение обмена энергиями между объектом и сенсором будет стремиться к нулю. В этом случае будет обеспечена высокая временная стабильность сигналов, характеризующих взаимодействие сенсора с объектом.

Высказанные мысли важны не только для вопросов получения информации с помощью сенсоров и выбора наиболее рациональных путей их проектирования. Они представляют интерес для защиты объектов и изделий от коррозии, повышения долговечности длительно контактирующих тел, изменения взглядов на пути построения более эффективных, чем существующие, технических устройств разного назначения. В какой-то степени они структурируют взгляды о возможности и невозможности получения тех или иных результатов и путях реализации этих возможностей.

Так, в частности, меняются некоторые взгляды на закономерности электрических процессов, наблюдающихся при электрокардиографии, электроэнцефалографии, электромиографии.

Рассматривая процессы регистрации изменений разности потенциалов между электродами, расположенными на кожном покрове или введенными внутрь тела, обычно считают, что источниками электрических сигналов являются потенциалы, имеющиеся в местах установки электрических электродов, так как будто к источнику напряжений подключены электроды. Эта упрощенная трактовка физических процессов является следствием представлений о кожном покрове человека как о поверхности, отдельные зоны которой имеют свои потенциалы. Их регистрация возможна путем непосредственного подключения электродов к элементам поверхности.

Более правильной будет являться видеоизменная трактовка наблюдающихся закономерностей. Смысл ее заключается в следующем. Электрические электроды после их установки находятся в непосредственном контакте с жидкой электропроводящей средой, имеющейся в слое эпидермиса. В момент их установки из-за процесса выравнивания энергий у контактирующих объектов в месте их соприкосновения появляется двойной электрический слой и возникает скачок потенциала. Изменение потенциала электрода происходит в результате изменения энергии частиц, находящихся в контакте с электродом, и количества частиц, участвующих во взаимодействии, при котором на электродах идут окислительно-восстановительные реакции. Итогом их являются регистрируемые изменения разности потенциалов. Если количество частиц, участвующих в реакциях, одинаково в каждую единицу времени и их собственные энергии одинаковы, то между электродами будет постоянная разность потенциалов. Если количество частиц, «несущих» энергию, и значения энергий каждой частицы изменяются в течение времени, то между электродами будут наблюдаться временные изменения разности потенциалов, которые регистрируются при электрокардиографии, электроэнцефалографии, электромиографии и пр.

Другими словами, потенциалы, регистрируемые между электродами, есть результаты взаимодействия с ними элементов жидкости, несущих энергию. При взаимодействии с электродами энергия выравнивается так, что в месте контакта обмен ею носит характер динамического равновесия, что обеспечивается возникшим двойным электрическим слоем. Количество частиц, несущих энергию (ионов), и их электрические заряды зависят от физиологических факторов, определяющих кинетику движения в данной зоне, и их химического состава, а также от физических полей, взаимодействующих с объектами, от которых в определенной степени зависит энергонасыщенность частиц.

Поляризацию электродов, наблюдающуюся при их длительном взаимодействии с увлажненным кожным покровом, можно объяснить застойными явлениями в движении ионов около электрода и недостаточно большой скоростью восстановления или окисления электродов, которую дополнительно уменьшают двойные электрические слои около них. В режимах практического отсутствия электрических токов, что характерно для всех электрофизиологических

исследований, без введения внешней электрической энергии, слой ионов около электродов увеличивается с течением времени. Внутреннее трение между электродами жидкости и слоем около электродов тормозит их движение и приводит к появлению «застойных» зон. Напряженность электрического поля в теле между слоями из зарядов, характеризующих поляризацию, уменьшается с течением времени. Это является проявлением фундаментальных свойств материи, в результате которых она приобретает то состояние и форму, при которых ее энергия минимальна. Наложение механических колебаний, которые уменьшают застойные явления, должно уменьшить влияние на результаты, получаемые с помощью контактных электродов, застойных явлений, появляющихся из-за трения между частицами объектов. Можно около электродов размещать источники акустических или ультразвуковых колебаний малой мощности, которые позволят существенно снизить влияние застойных явлений в кожном покрове под электродами. Можно также наложить на потенциал контактных электродов переменное достаточно высокочастотное напряжение, которое будет уменьшать поляризационные явления и в то же время легко отфильтровывается с помощью режекторных фильтров. Возможно и целесообразно комбинированное воздействие акустическими, ультразвуковыми и электрическими сигналами, которые должны резко снизить влияние поляризационных явлений и облегчить решение вопросов построения устройств для длительного мониторинга биологических объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Альтернативное объяснение особенностей получения информации, снимаемой с кожного покрова, позволило предложить способы уменьшения влияния факторов, затрудняющих длительный мониторинг состояния объекта, и объяснить физику наблюдающихся явлений. Без рассмотрения электрохимических особенностей взаимодействия и при отсутствии энергетического подхода к оценке наблюдающихся физических явлений, затруднительно получить те выводы и умозаключения, которые сделаны выше. Во всех случаях получения информации о состоянии организма с помощью контактных сенсорных систем, электрические сигналы следует рассматривать как результаты взаимодействия электродов с электролитами, и наблюдающиеся сигналы объяснять с учетом особенностей такого взаимодействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гусев, В. Г.** Измерительные операции и цепи в многофункциональной диагностической системе / В. Г. Гусев, Т. В. Мирина, А. Ю. Демин и др. // Медицинская техника. 2001. № 1. С. 16–19.

2. **Гусев, В. Г.** Получение информации о параметрах и характеристиках организма и физические методы воздействия на него / В. Г. Гусев. М. : Машиностроение, 2004. 597 с.

3. **Гусев, В. Г.** Концептуальные вопросы построения приборов для диагностики организма по электрическим параметрам локальных зон / В. Г. Гусев, Т. В. Мирина // Доклады VII международной конференции ФРЭМЭ. 2006. Кн. II. Владимир : Сбор, 2006. С. 41–43.

4. **Гусев, В. Г.** Электрические режимы для оценки состояния биофизических объектов / В. Г. Гусев, А. Ю. Демин, Т. В. Мирина // Датчики и системы. 2007. № 12, С. 19–21.

5. **Гусев, В. Г.** Разработки электронной аппаратуры для диагностики функциональных систем человека / В. Г. Гусев, А. Ю. Демин, Т. В. Мирина // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 9, № 6(24). С. 3–7.

ОБ АВТОРАХ



Гусев Владимир Георгиевич, проф. каф. ИИТ. Дипл. инж.-электромеханик (УАИ, 1965). Д-р техн. наук по элементам и устройствам выч. техники и системам управления (УАИ, 1987). Засл. деят. науки РБ, засл. изобр. БАССР. Иссл. в обл. электронных преобразователей.



Мирина Татьяна Владимировна, доц. той же каф. Дипл. инж.-электрик (УАИ, 1991). Канд. техн. наук по инф.-измер. и управляющ. системам (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. измерит. техники.



Демин Алексей Юрьевич, доц. той же каф. Дипл. магистр техн. и технол. по приборостроению (УГАТУ, 2000). Канд. техн. наук по элементам и устройствам выч. техники и системам управления (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. измерит. техники.