

УДК 621.317

Ф.Б.Гриневич, академик НАН Украины, В.Г.Мельник, канд.техн.наук (Ин-т электродинамики НАН Украины, Киев)

## О создании диагностических мостовых измерительно-информационных систем переменного тока и их применение в медицинской практике

*Рассмотрены возможности и преимущества применения мостовых методов измерения при медико-биологических исследованиях. Сформулированы основные требования к функциям и техническим характеристикам мостовых диагностических систем.*

*Розглянуто можливості та переваги застосування мостових методів вимірювання при медико-біологічних дослідженнях. Сформульовано основні вимоги до функцій та технічних характеристик мостових діагностичних систем.*

**Теоретические предпосылки применения мостов переменного тока для биомедицинских измерений.** В различных отраслях физики и химии широко используются методы определения состояния веществ и изделий по их электрическим характеристикам, определяемым в переменных электрических и магнитных полях. В различных веществах и физических телах присутствуют связанные и свободные электрические заряды, электрические и магнитные диполи, поляризованные и диссоциированные молекулы, анионные и катионные образования. Все эти компоненты имеют различную подвижность в переменных электрических и магнитных полях. В производстве электротехнических и радиотехнических материалов и изделий это обстоятельство используется для измерения и контроля параметров радиодеталей, полупроводниковых приборов, диэлектриков и проводников. В электрохимии широко применяются электрокондуктометрические методы исследования динамики химических процессов, определения степени диссоциации молекул и наличия в растворе солей, щелочей, кислот. Для определения электрических характеристик веществ с большим успехом могут быть применены мостовые методы измерений. Их преимущества заключаются в высокой чувствительности и точности, в инвариантности полученных результатов к неинформативным параметрам исследуемых объектов, в возможности одновременного определения нескольких взаимосвязанных величин.

В отделе электрических и магнитных измерений Института электродинамики НАН Украины на протяжении многих лет ведутся разработки мо-

стов переменного тока, предназначенных для измерений электрических параметров различных веществ. Эти исследования позволили создать исключительно высокоточные и высокочувствительные приборы, нашедшие применение для решения многих прикладных задач. В частности, были созданы приборы для определения концентрации электролитов, содержания солей в морской воде, контроля зольности сахара, содержания примесей в топливно-смазочных материалах, влажности древесины, бумаги, тканей, зерна и другой продукции. В рамках этих работ впервые был предложен и реализован многочастотный цифровой мост для электрохимических исследований, который был передан Институту электрохимии АН СССР (Москва) [13].

Очевидно, что аналогичные методы исследований могут быть применены и в медицине [4, 10, 14]. Действительно, уже давно применяется реография, т.е. измерение электрического сопротивления тканей человека для определения, например, кровоснабжения мозга. В свое время отделом электрических и магнитных измерений ИЭД НАН Украины и кафедрой урологии Киевского медицинского института под руководством академика А.Ф. Возианова была разработана установка для экспресс-диагностики урологических заболеваний по электрическим параметрам мочи, определяемым на переменном токе. Испытание установки дало положительные результаты. Приоритет этих работ защищен авторским свидетельством СССР [12].

В последнее время в ряде научных организаций Украины разрабатывались методы резистивной томографии и были предложены некоторые

принципы построения соответствующих измерительно-информационных систем [3]. Резистивная томография позволяет определить пространственное распределение удельной электропроводности в живых тканях и использовать эти данные для диагностики и мониторинга целого ряда патологий. Учитывая простоту и безопасность многократного применения, подобные методы могут использоваться при разработке новых способов лечения, в частности, быть основой для реализации управляемой терапии в нейрохирургии и других областях медицины.

Более полную информацию о процессах в организме можно получить путем измерения полного электрического импеданса биологических тканей. Определение комплексного сопротивления (параметры  $R$  и  $C$ ) позволяет дифференцированно диагностировать отеки и набухание тканей головного мозга в посттравматический и постоперационный период, контролировать состояние органов, предназначенных для пересадки в трансплантологии. В последние годы сотрудниками ИЭД НАН Украины совместно с Институтом нейрохирургии АМН Украины под руководством академика АМН Украины Ю.А.Зозули, член.-корр. АМН Украины Е.Г.Педаченко, проф. Т.М.Сергиенко был создан диагностический многопараметровый комплекс для контроля состояния тяжело больных с внутричерепной гипертензией [11].

Мостовые средства измерений позволяют с большим эффектом использовать дифференциальные методы исследований, обеспечивающие резкое повышение чувствительности и избирательности аппаратуры [1, 7, 9]. Применение микропроцессоров открывает широкие возможности для создания "разумных" импедансометрических измерительно-информационных систем, которые могут легко адаптироваться к решению разнообразных задач [5,8]. Эти достижения позволяют подойти по-новому к созданию мостовых измерительно-информационных систем для диагностики многих заболеваний человека и непрерывного контроля состояния пациентов. Могут быть также созданы принципиально новые биосенсорные системы, обеспечивающие быстрый автоматизированный биохимический анализ [2].

Функционирование биосенсорной системы основано на избирательном взаимодействии искомого вещества, входящего в состав исследуемого анализа, с биоселективным элементом, результатом которого является тот или иной физический эффект. Этот эффект воспринимается датчиком соответствующей физической величины и преобразуется им в электрические сигналы, которые регистрируются электронными устройствами. Такая комбинация биохимического и электронного преобразователей получила название "биоэлектронный датчик".

Регистрацию многих видов физических эффектов удобно осуществлять датчиками с выход-

ным сигналом в виде параметров электрического импеданса. Эти параметры могут быть измерены и зарегистрированы с очень высокой чувствительностью и точностью с помощью разработанных в ИЭД НАН Украины унифицированных мостовых аппаратно-программных комплексов. В настоящее время реализованы импедансометрические системы с биоэлектронными датчиками, использующими тепловые, оптические, электрохимические эффекты биохимических реакций [6].

Биологические жидкости и ткани представляют собой сложные конгломераты молекул и комплексов межмолекулярных образований. Так же, как и в физических телах, и химических растворах, в них присутствуют свободные и связанные электрические заряды. К свободным зарядам относятся анионы и катионы, образующиеся при диссоциации молекул веществ, аналогичным раствором солей и кислот. В биологических жидкостях и тканях, кроме солей и кислот, присутствуют также недиссоциирующие составляющие, например, белки. Молекулы таких веществ представляют собой диполи с различным дипольным моментом, зависящим от химического состава и структуры молекулы. Эти молекулярные диполи будут иметь различные моменты инерции и различную вязкость. В переменном электромагнитном поле эти диполи в колебательном движении поворачиваются на определенные углы, порождая токи смещения (емкостные токи), существенно зависящие от частоты. Различная зависимость емкостных токов от частоты позволяет дифференцировать состав недиссоциирующих компонентов жидкостей, провести точные количественные экспресс-исследования вещества. Связанные заряды могут находиться в квазикристаллических решетках и под действием электромагнитных полей также совершать колебательные движения. Как связанные, так и свободные заряды могут обладать различной подвижностью, находиться в сложных взаимодействиях с нейтральной окружающей средой. Эта среда в зависимости от свойств исследуемого вещества или тела может обладать различной электрической вязкостью, которая при воздействии переменных магнитных полей на вещество будет вызывать потери электрической энергии и превращение ее в тепловую.

Безусловно, все эти электрические характеристики будут зависеть от типа вещества или тела и от их состояния. Поэтому, измерив электрические характеристики биологической жидкости или ткани, мы можем в значительной степени судить об их состоянии.

Из-за сложности объекта исследования измерение электрических параметров биологических жидкостей и тканей должно производиться в исключительно широком диапазоне частот электромагнитных полей, а также при различных величинах их напряжений. При этом, электрические параметры жидкостей или тканей должны измеряться как комплексные электрические величины,

характеризующиеся комплексным импедансом (активным и реактивным сопротивлением) или иммитансом (активной и реактивной проводимостью).

Измерение электрических параметров тканей человека должно проводиться с помощью накладных или малоинвазивных (внедряемых в человеческий орган) многоэлектродных датчиков (сенсоров), а измерение электрических параметров жидкостей — с помощью специальных многоэлектродных электролитических ячеек.

В широком диапазоне частот должны быть определены следующие электрические характеристики биологических тканей и жидкостей:

- комплексное электронное и ионное сопротивление или проводимость;
- диэлектрическая проницаемость;
- тангенс угла электрических потерь или электрическая добротность;
- электрический фазовый угол импеданса или иммитанса;
- остаточная индуктивность и емкость сенсора.

Измерение таких параметров позволит:

- выделить диссоциированные составляющие, являющиеся источником анионов и катионов с различным зарядом;
- определить подвижность анионов и катионов;
- определить количественные соотношения ионов с различным зарядом и подвижностью;
- определить наличие дипольных молекул, величину их дипольных моментов, их взаимодействие с нейтральными (не дипольными) молекулами;
- определить электрическую вязкость биологических тканей и жидкостей.

Результаты измерений перечисленных выше характеристик и параметров, определенных в широком диапазоне частот и напряжений, должны быть обработаны с помощью компьютера, документированы и для наглядности представлены на дисплее персонального компьютера в виде соответствующих кривых, диаграмм и т.д.

Кроме создания собственно базовой измерительно-информационной системы, необходимо провести большой комплекс медицинских, биологических и электрохимических исследований для разработки методов диагностики и датчиков для применения созданной аппаратуры. Здесь должны быть использованы не только методы сопоставительного анализа, но и методы исследования с использованием современной аналитической и лечебной аппаратуры (томография, хроматография, электрофорез и др.).

Импедансометрическая аппаратура и соответствующие способы выявления заболеваний человека могут служить важным дополнением к существующим методам диагностики и быстро определять те отклонения функций и структуры орга-

нов и тканей от нормы, которые затруднительно выявить другими методами. К преимуществам рассматриваемых методов диагностики также следует отнести быстроту получения результатов исследований (несколько минут), их количественный и наглядный характер, возможность унификации и дешевизну приборов. На основе такой аппаратуры сотрудниками Института электродинамики НАН Украины, Института нейрохирургии им. А.П.Ромоданова АМН Украины, Института сердечно-сосудистой хирургии им. Н.М.Амосова АМН Украины созданы прототипы недорогих сетевых информационно-измерительных систем для непрерывного автоматического многопараметрового контроля состояния групп пациентов в реанимационных отделениях.

**Необходимые технические характеристики импедансометрической системы.** Для успешного проведения исследований необходимо, чтобы система имела следующие технические характеристики:

- а) частотный диапазон исследований — 1 Гц—1 МГц;
- б) диапазон подаваемых напряжений — от милливольт до единиц вольт;
- в) дискретность установки частоты — от 1000 точек на данном диапазоне;
- г) точность измерения — в средних диапазонах частот и значений импеданса (иммитанса) погрешность не должна превышать десятых долей процента, максимальная погрешность не должна превышать (при измерении сверхбольших и сверхмалых величин) единиц процентов;
- д) диапазон измерения — от долей Ома до сотен тысяч Ом;
- е) время измерения и исследования: время одного акта измерения на заданной частоте — от сотых до десятых долей секунды, а на ультранизких частотах — до единиц секунд, время полного исследования органа человека в широком диапазоне частот — не более нескольких минут;
- ж) в системе должно обеспечиваться практически полное исключение влияния подводящих проводов путем специальных схем подключения измерительных ячеек или сенсоров;
- з) специальные методы фильтрации измерительных сигналов должны подавить сетевые и радиопомехи в десятки и сотни тысяч раз;
- и) результаты исследований должны фиксироваться в памяти компьютера и выводиться на дисплей в виде номограмм (графиков) по измеряемому составляющему импеданса (иммитанса) в заданном диапазоне частот и напряжений;
- к) процесс измерения и исследования должен быть полностью автоматизирован: должны обеспечиваться дискретная или непрерывная установка частот, установка времени измерения в зависимости от частоты, уравнивание системы.

Интерпретация результатов измерения определяется предметом медико-биологических и хи-

мико-биологических исследований.

Предполагаемые области применения мостовых измерительно-информационных систем:

— исследование биологических жидкостей и тканей с целью экспресс-анализа их состояния и диагностики заболеваний;

— тестовые исследования посредством дифференциальных или относительных измерений в процессе воздействия лечебных веществ и лечения;

— анализ состояния биологических тканей, кровеносных сосудов, биологических жидкостей посредством измерения информативных параметров накладных емкостных или индуктивных датчиков, электролитических ячеек специальной конструкции;

— групповой мониторинг состояния тяжелобольных по комплексу жизненно-важных параметров.

Здесь представлены только некоторые соображения о возможности применения измерения комплексных электрических характеристик к исследованию сложных биологических объектов. В настоящее время отсутствуют данные о зарубежных или отечественных разработках, позволяющие реализовать все указанные выше технические возможности импедансометрических медико-диагностических систем.

Можно предположить, что проведение таких исследований будет способствовать совершенствованию диагностики и лечения заболеваний человека.

1. Василенко А.Д., Медведенко М.П., Мельник В.Г. и др. Исследование информативных параметров дифференциальных кондуктометрических биосенсоров // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2006. — Ч. 3. — С. 119—124.

2. Василенко О.Д., Мельник В.Г., Михаль О.О. та ін. Біосенсорні комплекси на основі імпедансометричних інформаційно-вимірювальних систем // Зб. наук. пр.: Дослідження у галузі сенсорних систем і технологій. — Київ. — 2006. — С. 287—297.

3. Дудикевич Т.В. Реконструкція розподілу питомої електричної провідності для технічних та біомедичних вимірювальних систем / Автореф. дис. канд. техн. наук.: 05.11.05. — НУ "Львівська політехніка". — Львів. — 19 с.

4. Колотилов Н.Н., Лопоногов О.А., Будницкая Е.А. и др. Применение методов измерения электрических параметров биологических тканей в медицине / В кн.: "Новые приборы и устройства в медицине". — Киев. Общество "Знание" УССР. — 1977.

5. Лукина И.В., Лысак А.В., Мельник В.Г. и др. Открытая сетевая информационно-измерительная система с реализацией обмена данными и управления по технологии "Клиент-сервер" // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2006. — Ч. 3. — С. 113—118.

6. Мельник В.Г. Импедансометрические аппаратно-программные комплексы биосенсорных систем // Праці ІЕД НАНУ. — 2006. — № 2(14). — С. 135—136.

7. Мельник В.Г. Построение высокочувствительных термометрических систем на основе мостовых схем с дифференциальными сенсорами // Праці ІЕД НАНУ. — 2005. — № 2(11). — Ч. 2. — С. 102—103.

8. Мельник В.Г., Василенко О.Д., Медведенко М.П. та ін. Високочутливі термометричні системи для біомедичних та технологічних вимірювань // Техн. електродинаміка. Тем. вип. "Проблеми сучасної електротехніки". — 2006. — Ч. 3. — С. 125—128.

9. Мельник В.О., Стародуб Н.Ф., Василенко А.Д. и др. Биотермосенсорные системы // Электроника и связь. — 2003. — № 20. — С. 132—135.

10. Сергієнко Т.М. Методика проведення раздельной импедансометрии мозга и биологического объекта // Вопросы нейрохирургии. — 1989. — № 3. — С. 47—49.

11. Сергієнко Т.М. Перспективи комп'ютерного моніторингу в нейрохірургії // Бюл. Української Асоціації нейрохірургів. — Київ. — 1998. — В. 5. — С. 83.

12. А.с. 1387980 (СССР). Устройство для измерения удельного электрического сопротивления биологической жидкости / Возианов А.Ф., Гриневич Ф.Б., Ищенко О.В., Сурду М.Н., Возианова Ж.И., Михаль А.А. // БИ. — 1988. — № 14.

13. А.с. 637679 СССР. Автоматический экстремальный мост / Повик А.И., Сурду М.Н., Шермет Л.П. // БИ — 1978. — № 46.

14. Groenlund J., Jalonen J., Vaelimacki I. Transcranial electrical impedance provides a means for quantifying pulsatile cerebral blood volume changes following head-up tilt / Early Hum. Dev., 47 (1): 11—18 (1997 Jan 3) Article.

Надійшла 31.01.07