

дения условия его устойчивости. Это условие выполняется в том случае, когда все полюсы его передаточной функции находятся внутри единичной окружности, расположенной на комплексной плоскости. Необходимость обеспечения устойчивости рекурсивного фильтра деконволюции накладывает дополнительные ограничения на порядок идентифицируемой модели. Эти ограничения можно рассматривать в качестве одного из критериев адекватности при выборе порядка оптимального фильтра деконволюции.

Применение фильтра деконволюции сильно ослабляет требования, предъявляемые к аппаратной части ИИС. В качестве основного требования, предъявляемого в этом случае к аналоговому фильтру, остается только обеспечение требуемого подавления сигнала в полосе задержания. А эта характеристика является наиболее стабильной, для большинства реальных аналоговых фильтров она практически достижима. Уменьшение крутизны АЧХ фильтра при этом не приводит к необходимости уменьшения диапазона рабочих частот (для устранения участка спада АЧХ), хотя и связано с некоторым снижением общей информативности измерений вследствие увеличения подавления общей мощности полезного сигнала. Таким образом, при использовании фильтра деконволюции, для эффективного использования 12-битного АЦП оказывается достаточно применения аналогового фильтра на базе микросхемы MAX274.

Дополнительное преимущество использования фильтра деконволюции заключается в том, что при этом уменьшаются вычислительные затраты алгоритма идентификации, так как порядок фактически идентифицируемой модели в этом случае уменьшается на порядок фильтра деконволюции. Особенно ярко это преимущество проявляется в условиях сильных линейных искажений.

Разработанный авторами исследовательский комплекс является универсальным и позволяет изучать как активные (при электрокардиографических и электроэнцефалографических исследованиях), так и пассивные (при реографических исследованиях) электрические свойства биообъекта. При проведении реографических исследований совместно с комплексом используется управляемый генератор возбуждающего тока, принцип построения которого описан в [3]. В настоящее время комплекс используется в ряде научных исследований, проводимых на кафедре ИТММБС Пензенской государственной технологической академии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гусев В.Г. Получение информации о параметрах и характеристиках организма и физические методы воздействия на него: Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 2004. – 597 с.
2. Рапопорт М.Б. Вычислительная техника в полевой геофизике: Учебник для вузов. – М.: Недра, 1993. – 350 с.
3. Киреев А.В. Система контроля пассивных электрических свойств биообъекта. Материалы XX Всероссийской научно-технической конференции «Биомедсистемы – 2007». Рязань. – 2007.

УДК 616-71

А.В. Киреев

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ МОДЕЛИ ПАССИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БИОБЪЕКТА ПРИ ПОСТРОЕНИИ БИОМЕТРИЧЕСКИХ ИИС

В настоящее время широкое распространение получили биометрические информационно-измерительные системы (ИИС), принцип работы которых основан на исследовании

пассивных электрических свойств биообъекта. К подобным системам относятся как ставшие уже классическими географические системы контроля центральной и периферической гемодинамики организма [1], так и сравнительно недавно появившиеся различные системы электропунктурной диагностики, и т.п. Однако существующие в настоящее время диагностические системы, построенные по этому принципу, за исключением, пожалуй, только географических систем, не получили широкого распространения. В первую очередь, это связано с более низкой диагностической ценностью, по сравнению с другими современными диагностическими методами (ультразвуковая доплероскопия, МР-томография и т.п.). Однако благодаря сочетанию ряда положительных качеств, свойственных ИИС, основанных на исследовании пассивных электрических свойств, таких, как возможность получения информации, часто недоступной для других диагностических методов; абсолютная безвредность, быстрота и оперативность проведения исследований, а также сравнительно низкая себестоимость ИИС, исследования в этой области не прекращаются и по настоящий день. Задача улучшения информационных характеристик измерительных систем, применяемых для исследования пассивных электрических свойств, в настоящее время является весьма актуальной.

В процессе разработки высокоинформативных ИИС изначально возникают определенные проблемы, связанные с корректной постановкой и формализацией решаемых задач. В рамках наших исследований эти затруднения отчасти снимаются благодаря использованию системного подхода, в котором задача исследования биообъекта рассматривается как задача идентификации его математической модели. При таком подходе информационные возможности ИИС контроля пассивных электрических свойств биообъекта однозначно определяются степенью адекватности принятой математической модели и эффективностью используемого метода ее идентификации. В настоящее время практически все методы исследования пассивных электрических свойств биообъекта, так или иначе, ассоциируются с реализацией измерений импеданса [2]. Причем чаще всего используется корреляционный метод измерения импеданса, позволяющий обеспечить получение максимальной точности измерений. С позиции системного анализа такие измерения можно рассматривать как одну из реализаций частотных методов идентификации. Основное преимущество этих методов как раз и заключается в возможности получения максимальной точности измерений. Кроме того, важным практическим преимуществом импедансных методов является возможность реализации всех вычислений на аналоговом уровне, что позволяет полностью отказаться от применения цифровых вычислительных устройств, однако в настоящее время это преимущество отходит на второй план и не является столь существенным.

При исследовании импеданса биообъекта рассматривается его линейная динамическая модель. Рассмотрение линейной модели позволяет существенно упростить поставленную задачу. В настоящее время теория линейных систем разработана очень хорошо. Для таких систем известно большое число эффективных методов идентификации. В этом случае линеаризация пассивных электрических свойств является оправданной благодаря специфике самого биообъекта, который в первом приближении можно рассматривать как линейную систему (при условии, что сила проходящего тока не превышает физиологическую норму).

Кроме описания линейной системы с помощью частотной зависимости импеданса, которая представляет собой непараметрическую модель и не может быть представлена в виде конечномерного вектора параметров, известны и другие способы [3]. В рамках наших исследований был проведен сравнительный анализ различных линейных моделей на предмет возможности их использования для описания пассивных электрических свойств биообъекта, причем основное внимание уделялось рассмотрению параметрических моделей с дискретным временем. Это связано с тем, что подобные модели наилучшим образом

подходят для реализации на цифровых ЭВМ. В качестве основного требования, предъявляемого к математической модели, нами рассматривалась возможность наиболее полного извлечения с ее помощью полезной информации из пассивных электрических свойств реального биообъекта.

Благодаря принятию гипотезы линейности пассивных электрических свойств биообъекта, рассмотрение поставленной задачи несколько упрощается, так как в качестве информационной характеристики биообъекта может быть использована его импульсная реакция. Импульсная реакция содержит всю информацию о линейной системе и является ее исчерпывающей характеристикой. Полнота извлечения информации из пассивных электрических свойств биообъекта с помощью линейной дискретно-временной модели определяется как типом используемой модели, так и параметрами дискретизации измеряемых и тестовых сигналов (ступени квантования и частоты дискретизации). Значения параметров дискретизации определяют исходную информативность первичной измерительной информации, а следовательно – предельно достижимую информативность измерений в целом. Значения шага дискретизации и ступени квантования измеряемых сигналов полностью определяются возможностями аппаратных средств, используемых в ИИС. Вопрос о количественном соотношении этих параметров и информативностью проводимых измерений выходит за рамки данной статьи.

Тип же используемой модели практически не связан с возможностями аппаратных средств, но именно он определяет окончательную информативность получаемых результатов измерений. Тип используемой модели определяет способ аппроксимации импульсной реакции биообъекта. Здесь необходимо подчеркнуть, что параметры одной модели, рассчитанные по одним и тем же отсчетам входных данных, не могут быть без потери точности пересчитаны в параметры другой модели, равно как и невозможно по параметрам идентифицированной модели в точности восстановить исходные данные, которые были использованы в ходе идентификации. В этом отношении процедура идентификации является необратимой, и никакая дополнительная обработка результатов идентификации не может привести к увеличению их информативности. Под увеличением информативности здесь понимается увеличение информационной энтропии данных. Что же касается возможности интерпретации данных, то она, конечно же, может быть улучшена. Так, в импедансных измерениях часто используются различные иерархические модельные структуры [2], в которых модель второго уровня устанавливает взаимосвязь параметров импеданса (модуля и фазы, измеренных на различных частотах) с другими, значительно лучше интерпретируемыми параметрами.

Наиболее точная оценка информативности измерений может быть получена, конечно, только на основании непосредственного вычисления информационной энтропии набора оцениваемых параметров. Однако получение такой оценки является слишком сложным и требует большого количества экспериментальных данных. Поэтому в рамках наших исследований использовался упрощенный подход, базирующийся на использовании различных критериев адекватности. При этом адекватность модели (степень ее содержательного соответствия реальному биообъекту) рассматривается как способность модели воспроизводить только присущие объекту моделирования свойства, при минимальной чувствительности к посторонним шумам. В этом смысле понятие адекватности модели и ее информационной способности являются качественно равноценными.

Существующие критерии адекватности математических моделей достаточно разнообразны [3]. Обычно они имеют очень ограниченную область применения, ограниченную конкретными узкоспециализированными областями. Однако практически все они сходятся в одном – чем адекватнее модель реальному объекту, тем меньше данных требуется для ее описания. В этом случае, если задаться одинаковой точностью описания импульсной реакции биообъекта с помощью различных типов модели, то сравнительная оценка их

адекватности может быть произведена на основании количества используемых параметров (с уменьшением числа параметров, требуемых моделью для описания объекта с заданной точностью, степень ее адекватности увеличивается).

На рис. 1 приведены различные аппроксимации характерной импульсной реакции биологической ткани. В данном случае приведены результаты исследований мышечной ткани (кисти левой руки человека). Для других типов ткани импульсные реакции имеют аналогичную форму. Приведенная импульсная реакция получена путем дифференцирования реакции ткани на ступенчатое токовое воздействие силой 47 мкА и представляет собой усредненный результат множества последовательных измерений. Запись сигналов проводилась с помощью АЦП платы Advantech PCI-1710, с частотой дискретизации 10 000 Гц.

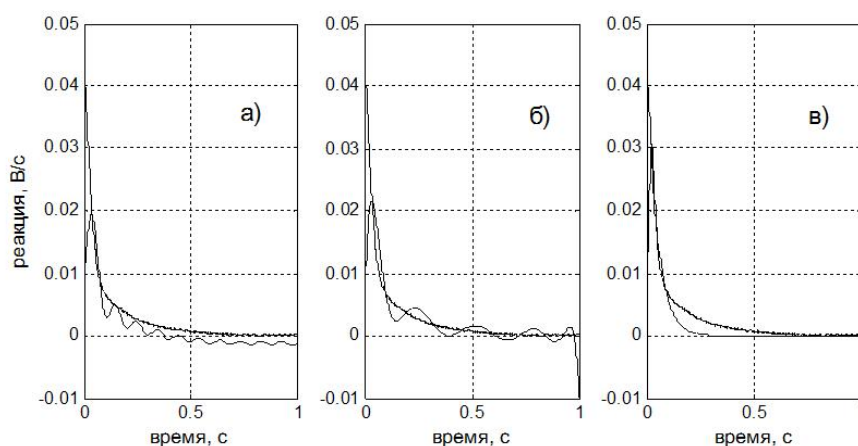


Рис. 1. Аппроксимации импульсной реакции биологической ткани

Все аппроксимации, приведенные на рисунке, построены при одной и той же равномерной дискретизации по времени (0,02 с). Гармоническая аппроксимация (а) соответствует представлению пассивных электрических свойств биообъекта частотной характеристикой (такое представление используется в импедансных измерениях). В данном случае использовано 20 отсчетов частот (40 параметров) с равномерным шагом от 0,5 до 10 Гц. Среднеквадратичное отклонение (СКО) этой аппроксимации составляет 0,0039.

Полиномиальная (б) аппроксимация импульсной реакции соответствует представлению пассивных электрических свойств биообъекта параметрической моделью с конечной импульсной характеристикой. В данном случае использован полином 10-го порядка (11 параметров). При этом СКО аппроксимации составило 0,0038, т.е. почти при одинаковой точности параметрическая модель с конечной импульсной характеристикой требует для описания пассивных электрических свойств биообъекта в 4 раза меньшего количества информации и, следовательно, является более адекватной по сравнению с «частотной» моделью.

Экспоненциальная (в) аппроксимация импульсной реакции соответствует представлению пассивных электрических свойств биообъекта параметрической моделью с бесконечной импульсной характеристикой (рекурсивным фильтром). В данном случае использована только одна комплексная экспонента (3 параметра). При этом СКО аппроксимации составило 0,0034, т.е. при одинаковой точности параметрическая модель с бесконечной импульсной характеристикой требует для описания пассивных электрических свойств биообъекта приблизительно в 4 раза меньшего количества информации, чем параметрическая

модель с конечной импульсной характеристикой и приблизительно в 13 раз меньшего количества информации чем «частотная модель».

Таким образом, параметрическая модель с бесконечной импульсной характеристикой является наиболее адекватной реальному биообъекту среди всех рассмотренных моделей. Важным преимуществом этой модели, по сравнению с другими, также является ее высокая экстраполирующая способность, позволяющая получать заданную точность аппроксимации импульсной реакции биообъекта на бесконечном временном интервале. Следовательно, применение для обработки первичной измерительной информации пассивных электрических свойств, идентификации этой модели позволяет осуществить наиболее полное извлечение полезной информации.

В заключение необходимо отметить, что реализация алгоритмов параметрической идентификации применительно к моделям с бесконечной импульсной характеристикой является значительно более сложной в вычислительном отношении, по сравнению с реализацией алгоритма корреляционных оценок импеданса. Это является главным недостатком, ограничивающим область применения методов параметрической идентификации в реальных ИИС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Овчаренко К.И., Седов В.П.* Неинвазивная диагностика нарушений периферического и церебрального кровообращения: Метод. рекомен. ЛОУ при СМ СССР. – М. – 1990. 47 с.
2. *Yan Cai and Secher N.H.* Deviations in the central blood volume as assessed by two-frequency electrical impedance. 11th International Conference on Electrical Bio-Impedance 2001. – Oslo. – 2001.
3. *Льонг, Леннарт.* Идентификация систем: Теория для пользователя / Пер. с англ. А.С. Манделя, А.В. Назина; Под ред. Я.З. Ципкина. – М.: Наука, 1991.

УДК 621.3.049.77

И.П. Бурукина

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОНОМНЫХ МЕДИЦИНСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ СПЛАЙНОВЫХ ВЕЙВЛЕТ- ФИЛЬТРОВ

Развитие медицинской науки и новые идеи в клинической медицине ставят всё новые задачи по созданию медицинской аппаратуры. В настоящее время использование в медицинской практике компьютера в сочетании с измерительной и управляющей техникой позволило создать новые эффективные средства для обеспечения автоматизированного сбора информации о состоянии пациента и ее обработки в режиме реального времени. Этот процесс привел к созданию медицинских измерительных приборов с новыми инструментальными методами исследования.

Приоритетным направлением в медицине является мониторинг здоровья населения. Автономные медицинские измерительные приборы (АМИП) являются ключевым звеном в системах мониторинга различного типа, работают в условиях непосредственного контакта с объектом исследования в реальном режиме времени и позволяют повысить качество профилактической и лечебно-диагностической работы. В медицинской практике широко используются АМИП, предназначенные для контроля деятельности сердечно-сосудистой системы по электрокардиограмме. Это связано с тем, что основная доля причин смертно-