

УДК 681.518

А.А. Штепа (канд. техн. наук)ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк
кафедра электронной техники
E-mail: A.Shtepa@mail.ru**ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПЦИИ СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОЙ
ОРГАНИЗАЦИИ МОДУЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРИЗИРОВАННОЙ
ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

Приведена и обоснована концепция проектирования, позволяющая строить компьютеризированную информационно-измерительную систему на основе модульного принципа объединения измерительных каналов единой структуры, которая обеспечивает получение сопоставимых, стабильных, воспроизводимых результатов совместных измерений разнотипных низкоамплитудных электрофизиологических сигналов.

Ключевые слова: электрофизиологический сигнал, информационно-измерительная система, модульная структура, цифровая обработка сигнала.

Общая постановка проблемы и актуальность

Широкое распространение в клинической практике имеют методы электрофизиологических исследований за счет своей информативности и хорошей воспроизводимости результатов в сочетании с минимальным воздействием на обследуемого. Приоритетным направлением развития методологии электрофизиологических исследований сегодня становится разработка методов комплексного автоматизированного анализа, основанного на регистрации и совместном сравнительном анализе сигналов нескольких типов. Многообразие и сложность форм электрофизиологических сигналов (ЭФС), трудность формализации решаемых исследовательских задач осложняют использование электрофизиологических методов исследований и приводят к необходимости оптимизации для каждой конкретной задачи как аппаратных так и алгоритмических решений.

В последнее время, характеризующееся высоким темпом развития микроэлектроники и вычислительной техники, стремление разработчиков к усовершенствованию привело к появлению ряда медицинских приборов для электрофизиологических исследований, имеющих различные передаточные характеристики, что делает невозможным сопоставление результатов одновременных измерений.

Следует отметить, что обозначенная проблема обуславливает потребность в решении задач повышения достоверности информации о состоянии здоровья человека и перехода на более высокий уровень диагностирования при ограниченных ресурсах измерительных устройств для цифровой обработки ЭФС. Подлежащие этим задачам концепции неотъемлемо связаны с современными технологиями обработки информации и особенностями проектирования компьютеризированных информационно-измерительных систем (КИИС), а также должны базироваться на единых методах обработки разнотипных ЭФС, которые обеспечивают получение правильных, сопоставимых, стабильных и воспроизводимых результатов измерения в рамках комплексного диагностического исследования.

Постановка задач исследования

Целью исследования является разработка и обоснование концепции проектирования, позволяющей строить КИИС ЭФС на основе модульного принципа объединения

измерительных каналов единой структуры и дальнейшей цифровой обработки сигнала, которая обеспечивает получение сопоставимых, стабильных, воспроизводимых результатов совместных измерений разнотипных низкоамплитудных электрофизиологических сигналов.

Изложение основного материала

Биопотенциалы, являющиеся источниками ЭфС для разных электрофизиологических исследований, являются весьма малыми по амплитуде и занимают области низких и инфранизких частот [1]. Диапазоны значений для ЭфС разного происхождения в значительной мере пересекаются, что дает потенциальную возможность объединить измерения нескольких ЭфС в рамках измерения единой ИИС табл. 1.

Таблица 1

Характеристики биопотенциалов тканей и органов

Органы, ткани	Диапазон частот, Гц	Диапазон амплитуд, мкВ
Сердце	0,05–2000	30–5000
Головной мозг: на поверхности скальпа	3,5–40	2–200
на открытом мозге	0,1–120	50–5000
Желудок	0,02–0,5	10–10000
Мышечные ткани	5–5000	100–10000
Глазные мышцы	0,5–50	2–200
Костные ткани	менее 1	до 10000
Спинальный мозг: медленные колебания	2–10	10–20
быстрые колебания	8–30	40–60

Программное и алгоритмическое обеспечение играют важную роль в системах измерения и регистрации ЭфС, которая определяет функциональность и потребительские свойства таких систем. Базовое требование к программному обеспечению заключается в обеспечении высокой степени достоверности измерения временных и амплитудных параметров структурных элементов ЭфС (интервалов, зубцов, сегментов, волн, комплексов), на основании которых врач будет проводить постановку диагноза. В подавляющем большинстве случаев обработка ЭфС может быть представлена следующие тремя этапами: сглаживание и фильтрация ЭфС; обнаружение и измерение характерных структурных элементов формы ЭфС; постановка диагностического заключения.

Единство или значительное перекрытие диапазонов большинства основных параметров ЭфС позволяет решать задачу одновременного измерения нескольких разнотипных сигналов с помощью КИИС, в основе которой лежит модульный принцип объединения измерительных каналов единой универсальной для всех ЭфС структуры. При этом обеспечивается возможность оператору самому определять необходимые для съема электроды. Более того, возможно создание модульных электрокардиографов или КИИС с широким спектром измеряемых ЭфС, в которых для усложнения схемы отведений достаточно добавить недостающее количество измерительных каналов и модифицировать программное обеспечение. С ростом числа каналов существенно снижаются удельные затраты для получения каждого нового отведения при общей высокой надежности устройства – это повышает эффективность применения КИИС в целом.

Наибольший же интерес такая структура представляет для научных исследований. Возможность сравнительно простого и быстрого изменения набора исследуемых электрофизиологических параметров наряду с идентичным строением измерительных каналов обеспечивают возможность проведение широкого круга экспериментов, данные которых могут быть адекватно сопоставлены как в пределах одного измерения, так и по всему циклу экспериментальных исследований. Модульность структуры в целом и идентичность измерительных каналов обеспечивает также возможность одновременного

измерения различных электрофизиологических сигналов одного объекта, что является актуальным направлением исследований в современной медицинской диагностике.

Анализ особенностей электрофизиологических сигналов, методов их исследования и обработки, исследование искажений сигналов КИИС ЭФС, вносимых собственными звеньями измерительных каналов позволяют сформулировать базисные функции КИИС. Разрабатываемая КИИС предназначена для измерения ЭФС и предоставления возможности дальнейшей обработки с целью применения любых методов диагностического анализа. Важнейшим условием, определяющим потребность в разработке и применении указанной ИИС, является обеспечение получения правильных, сопоставимых, стабильных и воспроизводимых результатов измерений в рамках единого комплексного диагностического исследования, базирующегося на совместном одновременном измерении и анализе нескольких разнотипных ЭФС. Базисными функциями системы являются: измерение ЭФС разных типов; обеспечения сопоставимости результатов измерений для разных ЭФС, одновременно измеряемых в ходе одного исследования; преобразование ЭФС с целью приведения их параметров в соответствие с требованиями применяемых в дальнейшем методов медико-диагностического анализа; оценку потерь информации причиненных эффектом Гиббса при цифровой обработке сигналов на основе ПФ в условиях работы с малым объемом выборки; хранение и документирование результатов измерений.

В соответствии с вышеизложенным, проведен анализ базисных функций. Функция измерения ЭФС разных типов, должна обеспечивать измерение в широких динамических пределах, ограниченных общим динамическим диапазоном разных ЭФС и общей полосой частот (табл. 1). Расширение динамического диапазона КИИС может быть достигнуто увеличением разрядности АЦП по сравнению с требуемой для регистрации ЭФС каждого типа. Доступные на сегодня микросхемы позволяют использовать АЦП с числом двоичных разрядов от 10-ти до 19-ти (например сигма-дельта АЦП) при приемлемой для ЭФС частоте дискретизации.

Обеспечение сопоставимости результатов измерений для разных ЭФС может достигаться разными способами. Зафиксировать некую схему для работы с ЭФС конкретного типа и требовать от производителей оборудования строгого соблюдения предложенного схемотехнического решения не представляется возможным, поскольку это остановило бы любые разработки техники в этой области. Существует метод восстановления (коррекции) сигнала с использованием апостериорной обработки, которая позволяет получить выходной сигнал наиболее близкий к входному. При этом получить функцию корректирующую искажения, вносимые каналом измерения можно либо измеряя ее с некоторой периодичностью и высокой точностью, либо воспользоваться математической моделью канала, что было бы приемлемо при несложном устройстве канала и высокой стабильности его компонентов. Несмотря на то, что методы такой коррекции применяются в некоторых областях довольно успешно, известно, что при наличии малейших ошибок измерений и помех на восстановленный таким образом сигнал накладывается случайная ложная структура и выигрыш, ожидаемый от компенсации систематических погрешностей измерительного канала становится незначительным. В этой ситуации хорошим выходом является использование в разработанной КИИС принципа построения измерительных каналов единой унифицированной структуры для всех типов ЭФС.

Основными источниками фазовых искажений сигнала являются фильтры высоких порядков, имеющих равномерную АЧХ в полосе пропускания и резкие ее спады, но весьма нелинейную ФЧХ. Исключение таких фильтров из аналоговой части измерительного канала позволяют значительно уменьшить проблему фазовых искажений. Применение цифровых фильтров позволяет получить все преимущества фильтров высокого порядка, при этом решение проблемы нелинейности ФЧХ сводится к применению известного способа повторной фильтрации сигнала в обратном направлении.

Оценка потерь информации, причиненных эффектом Гиббса при цифровой обработке сигналов на основе ПФ становится актуальной в условиях работы с малым объемом выборки. А ограничение на объем выборки в КИИС ЭФС накладываются сразу несколькими обстоятельствами. Во-первых, анализ ЭФС обычно сводится к тонкому исследованию формы единственного периода кардиограммы или реографического сигнала [2, 3]. При этом для анализа выбирают 5-7 периодов сигнала наименее искаженных артефактами физиологического происхождения (шевеления, неравномерного дыхания, спазмов и т.д.), а такие участки обычно имеют малую длительность. Во-вторых повышение разрядности АЦП приводит к ограничению частоты дискретизации, поэтому ее увеличением затруднительно значительно увеличить объем выборки. И в-третьих, увеличение объема выборки приводит к значительному увеличению времени обработки сигнала при использовании ПФ.

Хранение и документирование результатов измерений для КИИС ЭФС выполняется средствами входящего в состав системы компьютера. При этом важной особенностью организации данных является хранение вместе с измерительным сигналом всех параметров самого измерительного канала, включая те, которые были модифицированы оператором непосредственно перед измерением. Эти важные данные и могут понадобиться при необходимости сопоставления сигналов, полученных в ходе разных диагностических исследований.

Таким образом, расширение функциональных возможностей КИИС ЭФС за счет унификации структуры измерительных каналов и повышения точности путем коррекции искажений, вносимых при цифровой обработке [4], достигается реализацией концепции построения модульной структуры системы, в основу которой положены следующие принципы:

- единство конструкции всех измерительных каналов за счет исключения из их состава блоков, характерных для конкретного вида электрофизиологических сигналов и способных вносить серьезные искажения в сигнал за счет нелинейности ФЧХ;

- передача максимального числа функций преобразования измерительных сигналов в область последующей цифровой обработки, обеспечивающей все достоинства цифровых фильтров высокого порядка и лишенной проблем нелинейности ФЧХ (такой подход актуален для новых видов исследований в кардиологии и гемодинамике [5, 6, 7]), которые подразумевают весьма широкое применение методов цифровой обработки сигналов;

- использование высокоразрядных АЦП (как, например, сигма-дельта преобразователи применяющиеся для электрокардиографии высокого разрешения [8]) с целью обеспечения охвата общего требуемого динамического диапазона всего комплекса контролируемых электрофизиологических параметров с учетом помех в каждом из каналов.

При переходе от аналоговой схемотехники электрокардиографов к полностью цифровой обработке появляется потребность в цифровых фильтрах ЭФС. Фильтрация в частотной области обеспечивает большую точность восстановления сигнала и более крутые фронты характеристик. Задача восстановления сигнала с помощью корректирующего фильтра в ряде случаев может быть совмещена с фильтрацией, требуемой методами анализа медицинской диагностики. Например, для выделения некоторой полосы частот или подавления помехи, сконцентрированной в известной полосе в соответствии с существующими стандартами и рекомендациями [9, 10]. В любом случае фильтрацию проводят на ограниченном частотном диапазоне, где сосредоточена информативная часть сигнала и передаточная функция измерительного канала не равна нулю. Для устранения искажений, связанных с нелинейностью фильтра-корректора, фильтрацию проводят повторно на выборке с измененным на противоположный порядком элементов, а затем возвращают их исходный порядок. На основании проведенных исследований метод цифровой обработки электрофизиологических сигналов можно сформулировать в виде следующего алгоритма (рис. 1).

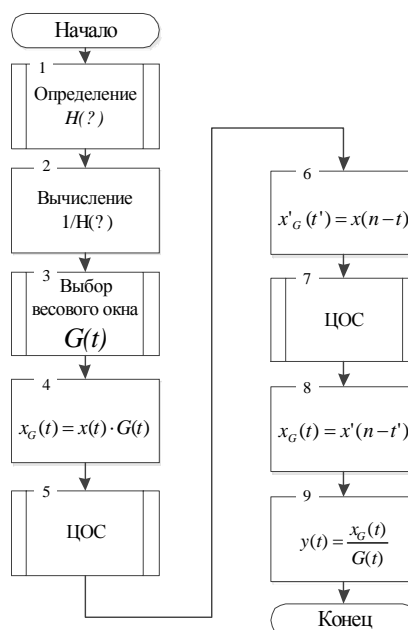


Рисунок 1 - Блок-схема метода цифровой обработки электрофизиологических сигналов

1. Определение передаточной функции каждого измерительного канала $H(\omega)$. Это можно осуществить двумя способами: измерением или вычислением. Измерение передаточной функции измерительного канала – задача сложная сама по себе и требует применения специального оборудования. Такой путь может быть оправдан только в случае применения измерительного канала сложной структуры. Повышение требований к стабильности номиналов компонентов схемы в этом случае дает основание предполагать необходимость периодического измерения и корректировки $H(\omega)$. Структура измерительного канала подразумевает отсутствие сложных фильтров или усилителей со специфичной передаточной функцией. Поэтому определение $H(\omega)$ целесообразно проводить аналитическим вычислением исходя из данных об усилителе и ФНЧ, входящих в состав интегральных схем составляющих измерительный канал. При этом следует учитывать, что обычно такие усилители имеют достаточную линейность характеристик, а фильтры нижних частот малый порядок. Кроме того эти компоненты в интегральном исполнении отличаются также и высокой стабильностью своих характеристик и параметров.

2. Вычисление передаточной функция корректирующего фильтра $1/H(\omega)$. Если для дальнейшей обработки предполагается прямая свертка во временной области, то вычисляем импульсную характеристику (обратное ДПФ от передаточной характеристики).

3. Выбор весового окна, оптимального с точки зрения уменьшения краевых искажений. При этом критерий выбора должен учитывать в первую очередь искажение формы сигнала во временной области, поскольку именно форма сигнала (а не спектр или мощность) являются наиболее информативным с точки зрения медикодиагностического анализа ЭФС в подавляющем большинстве случаев. Исследования показали, что наиболее эффективными в этом отношении являются окна Блэкмана, Ханна и окно Кайзера [4].

4. Умножение сигнала полученного с помощью i -го измерительного канала $x_i(t)$ на функцию весового окна.

5. Осуществление фильтрации для восстановления сигнала. Дополнительная фильтрация сигнала в соответствии с применяемой методикой обработки для анализа ЭФС.

6. Отображение результата фильтрации в обратном порядке.

7. Повторная фильтрация с целью устранения искажений связанных с нелинейностью ФЧХ фильтра-корректора.

8. Восстановление порядка значений корректируемого сигнала
9. Деление на функцию весового окна.

Анализ результатов

Предложенная компьютеризированная ИИС будет отличаться схемотехническими и алгоритмическими решениями, подчиняющимися предложенной концепции, в соответствии с которой обеспечивается получение достоверных, сопоставимых, стабильных и воспроизводимых результатов измерения разнотипных электрофизиологических параметров.

При проектировании ИИС на основе алгоритма апостериорного цифрового восстановления сигналов появляется возможность полностью отказаться от ФВЧ с его крупногабаритными высокостабильными конденсаторами, поскольку набор высококачественных цифровых ФВЧ – реализуется программным способом или работа вовсе ведется с нулевой нижней частотой, что свойственно приборам в сфере научных исследований. В составе унифицированного измерительного канала входит усилитель и ФНЧ, с параметрами, охватывающими весь спектр ЭфС, а проблема расширения динамического диапазона решается применением АЦП с большой разрядностью.

Выводы

На основании анализа современных методов электрофизиологического исследования выделена актуальная тенденция к увеличению комплексных диагностических исследований с необходимостью одновременного измерения и совместного анализа разнотипных электрофизиологических сигналов, что поднимает проблему получения сопоставимых, стабильных и воспроизводимых результатов таких измерений.

Предложена концепция построения модульной структуры КИИС электрофизиологических сигналов, в основу которой положены следующие принципы: единство конструкции всех измерительных каналов за счет исключения из их состава блоков, характерных для конкретного вида электрофизиологических сигналов; передача максимального числа функций преобразования измерительных сигналов в область последующей цифровой обработки; использование высокоразрядных АЦП с целью обеспечения охвата общего требуемого динамического диапазона всего комплекса контролируемых электрофизиологических параметров с учетом помех в каждом из каналов.

Список использованной литературы

1. Зайченко К.В., Жаринов О.О., Кулин А.Н. и др. (2001) Съём и обработка биоэлектрических сигналов: Учеб. пособие / под ред. Зайченко К.В. – СПб. : СПбГУАП, 2001. – 140 с.
2. Орлов В.Н. Руководство по электрокардиографии / Орлов В.Н. – М. : Медицинское информационное агентство, 2007. – 528 с.
3. Барановский А. Л., Калиниченко А. Н., Манило Л.А. и др. Кардиомониторы. Аппаратура непрерывного контроля ЭКГ : Учеб. пособие для вузов. / под ред. А.Л. Барановского и А.П. Немирко – М. : Радио и связь, 1993. – 248 с.
4. Штепа А.А. Метод исследования и оценки методической погрешности цифровой обработки сигналов в измерительных каналах ИИС электрофизиологической диагностики / А.А. Штепа // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту. – Донецьк, 2012. – Вип. 32. – С. 110–116.
5. Rudenko M. Theoretical Principles of Heart Cycle Phase Analysis / Rudenko M., Voronova O., Zernov V. – New York : Fouqué Literaturverlag, 2011. – 415 p.
6. Konstantine Mamberger. General problems of metrology and indirect measuring in cardiology: error estimation criteria for indirect measurements of heart cycle phase durations; in e-Journal Cardiometry No.1, 2012; С. 152-165.

7. Vladimir Fedorov, Konstantine Mamberger. Wavelet transform procedure as the basis for complete automatic interpretation of the cardiac cycle phase structure; in e-Journal *Cardiometry* No-1, 2012; pp. 125-131.
8. Curtin M. Sigma-Delta techniques reduce hardware count and power consumption in biomedical analog front end / M. Curtin // *Analog Dialogue Journal*. – 1994. – V. 28. – № 2. – P. 6–8
9. Recommendation for standardization and specification in automated electrocardiography: bandwidth and digital signal processing. A report for health professionals by an ad hoc writing group of the committee on electrocardiography and cardiac electrophysiology of the Council on Clinical Cardiology / J. J. Bailey, A. S. Berson, A. Garson [et al.] // American Heart Association. – *Circulation*. – 1990. – V. 81. – 730 p.
10. AAMI Standards and Recommended Practices, Biomedical Equipment. AAMI. – Arlington, Virg., 1993. – V. 2 – 4th ed. – 230 p.

References

1. Zaychenko, K. V., Zharinov, O.O., Kulin, A.N. and others, (2001), *S'em i obrabotka bioelektricheskikh signalov: Ucheb. posobie*, in Zaychenko, K.V., St.-Petersburg, Russia.
2. Orlov B.H. (2007) *Rukovodstvo po elektrokardiografii* / Meditsi-nskoe informatsionnoe agentstvo, Moscow, Russia.
3. Baranovskiy, A. L., Kalinichenko, A. N., Manilo, L.A. and others (1993), *Kardiomonitoriyi. Apparatura nepreryivnogo kontrolya EKG : Ucheb. posobie dlya vuzov*, in Baranovskiy, A.L. and Nemirko, A.P., Radio i svyaz, Moscow, Russia.
4. Shtepa, A.A., (2012), “Metod issledovaniya i otsenki metodicheskoy pogreshnosti tsifrovoy obrabotki signalov v izmeritelnykh kanalah IIS elektrofiziologicheskoy diagnostiki”, *Zbirnik naukovih prats Donetskogo Institutu zaliznichnogo transportu Ukrayinskoyi derzhavnoyi akademiyi zaliznichnogo transportu. Donetsk*, vol. 32., pp. 110–116.
5. Rudenko, M., Voronova, O. and Zernov, V., (2011), *Theoretical Principles of Heart Cycle Phase Analysis*, Fouqué Literaturverlag, New York.
6. Mamberger, K., (2012), “General problems of metrology and indirect measuring in cardiology: error estimation criteria for indirect measurements of heart cycle phase durations”, *e-Journal Cardiometry* No.1, pp. 152–165.
7. Fedorov, V. and Mamberger, K., (2012) “Wavelet transform procedure as the basis for complete automatic interpretation of the cardiac cycle phase structure”, *e-Journal Cardiometry*, no.1, pp.125–131.
8. Curtin M., (1994), “Sigma-Delta techniques reduce hardware count and power consumption in biomedical analog front end”, *Analog Dialogue Journal*, vol. 28, no. 2, pp. 6–8.
9. Bailey, J. J., Berson, A. S., Garson, A. [et al.] (1990), Recommendation for standardization and specification in automated electrocardiography: bandwidth and digital signal processing. A report for health professionals by an ad hoc writing group of the committee on electrocardiography and cardiac electrophysiology of the Council on Clinical Cardiology, *American Heart Association*. v.81.
10. AAMI (1993), *AAMI Standards and Recommended Practices, Biomedical Equipment*. Arlington, Virg., vol. 2, 4th ed.

Надійшла до редакції:
20.05.2014 р.

Рецензент:
докт. техн. наук, проф. Зорі А.А.

О.А. Штепа

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Обґрунтування концепції структурно-алгоритмічної організації модульної комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи електрофізіологічних сигналів.

Наведено і обґрунтовано концепцію проектування, що дозволяє будувати комп'ютеризовану інформаційно-вимірвальну систему на основі модульного принципу об'єднання вимірвальних каналів єдиної структури, яка забезпечує отримання порівнянних, стабільних, відтворюваних результатів спільних вимірювань різноманітних низькоамплітудних електрофізіологічних сигналів.

Ключові слова: електрофізіологічний сигнал, інформаційно-вимірвальна система, модульна структура, цифрова обробка сигналів.

A.A. Shtepa

Donetsk National Technical University

Substantiation of the structural-algorithmic organization concept for modular electrophysiological signals computerized information-measuring system. Presented and substantiated the concept design, which allows to build a computerized information and measuring system based on a modular principle of combining the unified structure measurement channels, that provides a comparable, stable, reproducible measurements of different types of low-amplitude joint electrophysiological signals. A proposed computerized information-measuring system will be different circuit and algorithmic solutions that report proposed concept, under which provide credible, comparable, stable and reproducible measurement results diverse electrophysiological parameters. When designing information-measuring systems on the basis of algorithm of a posteriori digital recovery signals the possibility to completely abandon the high pass filter with its large solid-state capacitors, as a set of high quality digital filters implemented programmatically or work is underway with a zero lower frequency, which is characteristic of instruments in the field of scientific research. As part of unified measurement channel comes with a power amplifier and a high-pass filter, with parameters covering the whole range of electrophysiological signals, and the problem of expansion of dynamic range is solved by use ADC with a high resolution. On the basis of analysis of modern methods of electrophysiological study highlighted the current trend towards increasing comprehensive diagnostic investigations with the necessity of simultaneous measurement and joint analysis of different types of electrophysiological signals that raises the problem of obtaining comparable, stable and reproducible results of such measurements. Proposed and substantiated the concept of construction of the modular structure of computer-aided information-measuring system of electrophysiological signals, based on the following principles: unity of design all measuring channels by excluding from their units, specific types of electrophysiological signals; transfer the maximum number of conversion functions measuring signals in the area of subsequent digital processing; use of ADC with a high resolution order to reach the required total dynamic range of the whole complex of controlled electrophysiological parameters, taking into account interference in each of the channels.

Keywords: electrophysiological signal, information-measuring system, the modular structure, digital signal processing.



Штепа Александр Анатольевич, Украина, закончил Донецкий государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент кафедры электронной техники ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» (ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина). Основное направление научной деятельности – регистрация, выделение и обработка электрофизиологических сигналов.