

8. Virtual Reality in Psychology: Therapy and Research / <https://medium.com/sciforce/virtual-reality-in-psychology-therapy-and-research-525bd9e4283a> (дата обращения 27.07.2020 г.).
9. *Rahman Y.A., Hoque M.M., Zinnah K.I., Bokhary I.M.* Helping-hand: A data glove technology for rehabilitation of monoplegia patients / In: 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST). IEEE. 2014. PP. 199-204.
10. Официальный сайт Центра цифровых реабилитационных технологий «Степс Реабил» / <http://stepsreabil.com/> (дата обращения 27.07.2020 г.).
11. *Nikolsky A.E., Petrunina E.V., Istomina T.V.* Modern methods and means of rehabilitation and social adaptation (physical and rehabilitation medicine) / LAMBERT Academic Publishing, 2019.
12. *Istomina T.V., Filatov I.A., Safronov A.I., Istomin V.V. et al.* Multi-channel biopotential network analyzer for remote rehabilitation of patients with postural deficiencies // Biomed. Eng. 2014. Vol. 48. № 3. PP. 120-125.
13. Помехи при регистрации электрокардиограммы и методы их устранения. Электронное учебное пособие / <https://cyberpedia.su/14x7399.html> (дата обращения 27.07.2020 г.).
14. *Дубровин В.И., Твердохлеб Ю.В.* Усовершенствование методов анализа ЭКГ-сигналов на основе вейвлет-преобразования в системе электрокардиографии высокого разрешения // Радиотехника и информатика. 2011. № 1 (24).
15. *Подкур П.Н., Смоленцев Н.К.* Вейвлет-пакетное разложение ЭЭГ на основные частотные ритмы // Вестник ТГУ. Управление, вычислительная техника и информатика. 2016. № 2 (35).
16. *Кузнецов С.Ю. и др.* Вейвлет-анализ поверхностной электромиограммы // Физиология человека. 2011. Т. 37. № 5. С. 129-136.
17. *Истомина Т.В., Чувькин Б.В., Щеголев В.А.* Применение теории wavelets в задачах обработки информации / Монография. – Пенза: ПГУ, 2000. 188 с.
18. *Яковлев А.Н.* Введение в вейвлет-преобразования. – НГТУ, 2003.
19. Вейвлет-преобразование. Глава 4. Обработка и анализ данных. Электронное учебное пособие / <http://gwyddion.net/documentation/user-guide-ru/wavelet-transform.html> (дата обращения 27.07.2020 г.).
20. *Добеши И.* Десять лекций по вейвлетам. – М.: Ижевск: РХД, 2001.

Татьяна Викторовна Истомина,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра информационных технологий
и прикладной математики,
ФГБОУ ИВО «Московский государственный
гуманитарно-экономический университет»,
профессор,
кафедра основ радиотехники,
НИУ «Московский энергетический институт»,
Елена Валерьевна Петрунина,
канд. техн. наук, декан,
факультет прикладной математики и информатики,
ФГБОУ ИВО «Московский государственный
гуманитарно-экономический университет»,
Виктор Владимирович Истомин,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра информационных технологий
и прикладной математики,
ФГБОУ ИВО «Московский государственный
гуманитарно-экономический университет»,
доцент,
кафедра основ радиотехники,
НИУ «Московский энергетический институт»,
Наталья Васильевна Труб,
ст. преподаватель,
кафедра информационных технологий
и прикладной математики,
ФГБОУ ИВО «Московский государственный
гуманитарно-экономический университет»,
Елена Владимировна Копылова,
доцент,
кафедра основ радиотехники,
НИУ «Московский энергетический институт»,
г. Москва,
e-mail: istom@mail.ru

Работы коллектива одной из ведущих научных школ РФ «Радиоэлектронные и информационные средства оценки физиологических параметров живых систем» (РЭИС ЖС) во главе с профессором, д.т.н. К.В. Зайченко. Советом по грантам Президента Российской Федерации коллектив научной школы РЭИС ЖС был признан победителем конкурса ведущих научных школ РФ (свидетельство НИШ-3455.2012.8).

Профессор, д.т.н. К.В. Зайченко выступил на международной конференции «ФРЭМЭ'20» с пленарным докладом, в котором были изложены результаты, приведенные в двух статьях, опубликованных в этом номере нашего журнала.

К.В. Зайченко, А.А. Кордюкова, Е.П. Логачев, М.Н. Лучкова

Медицинские аспекты применения радиолокационных методов обработки сигналов при реализации электрокардиографии сверхвысокого разрешения

Аннотация

Применение радиолокационных технологий и методов обработки сигналов позволило реализовать новый высокоэффективный авторский метод исследований биоэлектрической активности сердца – электрокардиографию сверхвысокого разрешения. В процессе его реализации осуществлен синтез оптимальных и подоптимальных алгоритмов и структур обнаружения отдельной компоненты полезного электрокардиосигнала. Это позволило разработать комплекс схемотехнических, алгоритмических и программных средств для выделения и обработки новых ЭКГ-маркеров процесса развития патологий сердечно-сосудистой системы.

Введение

При электрофизиологических исследованиях биоэлектрической активности сердца регистрируемые сигналы $y(t)$ являются слабыми и шумоподобными, однако содержат полезный

электрокардиосигнал (ЭКС), состоящий из отдельных компонент (ОК), в том числе низкоамплитудных и высокочастотных информационно значимых составляющих – микропотенциалов, которые имеют важное диагностическое значение для выявления кардиопатологий. Кроме того, в $y(t)$ имеются шу-

мовые и помеховые $w(t)$ -сигналы различной природы. Для их выделения, а также для дальнейшего исследования тонкой структуры электрокардиосигналов с конечной целью фиксации патологических изменений не только в классических зонах их обработки, но и в зонах, считающихся артефактами, на основе применения радиолокационных (РЛ) технологий и методов обработки сигналов [1], [2] реализован новый высокоэффективный авторский метод – электрокардиография сверхвысокого разрешения (ЭКГ СВР). Его основные идеи состоят в расширении амплитудного и частотного диапазонов регистрации и обработки ЭКС и в обеспечении наиболее высокой разрешающей способности, а следовательно, и требуемой степени детализации составляющих исследуемого сигнала.

На первом этапе реализации метода ЭКГ СВР в соответствии с положениями и требованиями теорий статистических решений и обнаружения сигналов необходимо провести синтез оптимальных и подоптимальных алгоритмов и структур обнаружения ОК полезного электрокардиосигнала. На втором этапе следует использовать полученные результаты при разработке схемотехнических, алгоритмических и программных средства для выделения и обработки полезных кардиосигналов на фоне шумов и помех различной природы. Решению этих задач и посвящена данная работа.

Синтез оптимальных и подоптимальных алгоритмов и структур обнаружения отдельных компонент полезного электрокардиосигнала

Из теории построения радиолокационных систем известно, что оценке параметров случайных сигналов предшествует установление наличия или отсутствия самого сигнала – задача его обнаружения. На первом этапе ее решения будем считать, что на входе системы имеется случайный процесс $y(t) = s(t) + w(t)$ в виде ОК полезного сигнала $s(t)$ с частотой ω на фоне белого шума $w(t)$ со спектральной плотностью мощности N_0 . К шуму $w(t)$ в данном случае мы свели все помеховые воздействия на электрокардиосигнал. На втором этапе в соответствии с положениями и требованиями теорий статистических решений и обнаружения сигналов необходимо было разработать модели регистрируемого на входе системы сигнала $y(t)$. Были созданы феноменологические и биофизические, а на их основе – математические модели всех перечисленных составляющих входного процесса, отражающие их статистические свойства. Все это позволило перейти к выполнению таких задач, как непосредственный синтез оптимальных и подоптимальных алгоритмов и структур обнаружения отдельных компонент полезного электрокардиосигнала, а также применение его результатов при разработке электронного блока обработки ЭКС СВР.

Итак, нас интересует оценивание частоты ω отдельной компоненты (ОК) полезного ЭКС $s(t)$, для которой необходимо обеспечить требуемое разрешение при решении задачи ее обнаружения. К этой же процедуре сводится и выделение совокупности ОК полезного ЭКС. В общем случае для отдельной компоненты полезного ЭКС характерно рассеяние по частоте, т. е. она имеет конечную ширину спектра $\Delta\omega$. В связи с этим необходимо синтезировать оптимальные алгоритмы обнаружения отдельных компонент полезного ЭКС $s(t)$, позволяющие

производить также предварительную грубую оценку их частоты. Результат синтеза представлен на рис. 1. Схема позволяет одновременно с решением задачи обнаружения ОК полезного сигнала произвести грубую оценку ее частоты $\hat{\omega}_i$. На рис. 1 пунктиром обведены операции, выполняемые устройством спектральной обработки (УСО).

Следует отметить, что в рассмотренном случае синтеза устройств спектральной обработки сигналов может быть реализовано в виде различных многоканальных систем фильтрации электрокардиосигналов с достаточно высоким разрешением по частоте, а также с использованием различных спектроанализаторов.

Полученные подоптимальные процедуры обработки справедливы и для обнаружения нескольких ОК полезного ЭКС $s(t)$ с неперекрывающимися спектрами, параллельно обрабатываемых в многоканальной электрокардиографической системе обнаружения. Однако в схемной реализации данный подход может быть использован без существенных потерь в виде многоканальной структуры для обработки нескольких ОК полезного ЭКС и с перекрывающимися спектрами.

Подробно описанный процесс синтеза оптимальных и подоптимальных алгоритмов и структур обнаружения отдельных компонент полезного электрокардиосигнала изложены в [3].

Многоканальная обработка ЭКС СВР

На базе результатов синтеза был разработан электронный блок, реализующий многоканальную обработку ЭКС СВР с каждого отведения [4]. В этом блоке заложено оптимальное сочетание аналоговых и цифровых методов обработки кардиосигналов, что позволяет надежно выделять все их компоненты за счет расширения амплитудного и частотного диапазонов их регистрации до минимального уровня амплитуды полезного сигнала около 10 нВ и до его максимальной обрабатываемой частоты около 2 кГц. Для этого в каждом отведении регистрации ЭКС осуществлено разделение каналов на низкочастотные (НЧ) и высокочастотные (ВЧ). НЧ-каналы реализуются в аналоговой схемотехнике, а все ВЧ-каналы – в цифровой обработке ЭКС. При разработке аналоговых каналов за счет использования самой современной элементной базы, в том числе низкошумящих усилителей, а также специальных схемотехнических решений реализованы высокий входной импеданс, симметрия плеч дифференциального каскада и минимальный уровень собственных шумов. Кроме того, удалось увеличить коэффициент усиления полезного сигнала до предельных значений (порядка $10^3 \dots 10^4$). Это позволило обеспечить требуемое сверхвысокое разрешение ЭКС в аналоговой части электронного блока по амплитуде. Помимо решения задачи выделения низкочастотных составляющих сигнала НЧ-каналы используются в качестве каналов синхронизации и источника информации для всех трактов обработки ЭКС и всех процедур вторичной обработки данных, извлеченных из ВЧ-каналов данного отведения. Для реализации ВЧ-каналов используются цифровые фильтры, позволяющие выделять необходимые для анализа отдельные компоненты полезного кардиосигнала. Такая цифровая обработка дает возможность сформировать в каждом отведении требуемое количество отдельных ВЧ-каналов. Это позволяет не только расширить ди-

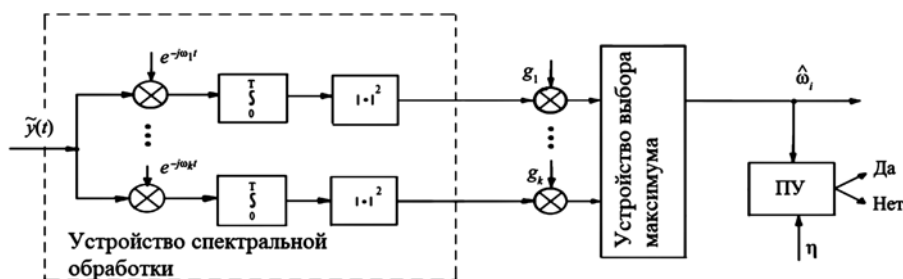


Рис. 1. Структурная схема обнаружителя отдельной компоненты полезного электрокардиосигнала с рассеянием по частоте с грубой оценкой ее частоты

намический диапазон обработки высокочастотных составляющих ЭКС, но также идентифицировать и отдельно обработать все его отдельные полезные компоненты.

Применение процедур адаптации при первичной обработке ЭКС СВР

При реализации метода ЭКГ СВР единственным способом удовлетворения всех требований к алгоритмам и структурам обработки ЭКС является адаптация разрабатываемых процедур и их схемотехнических решений к характеристикам сигналов в трактах электронного блока обработки ЭКС СВР. В связи с этим предложена адаптивная регулировка параметров системы обработки ЭКС, основанная на комплексном сочетании аналоговой схемотехники, аналого-цифрового и цифро-аналогового преобразований (АЦП-ЦАП) и цифровой обработки информационных сигналов в зависимости от их характеристик в различных каналах блока. Была предложена двухступенчатая процедура высокоточного аналого-цифрового преобразования: на первой ступени определяется грубое значение амплитуды ЭКС, а на второй используются максимальные возможности высокоразрядного (до 24 бит) многоканального АЦП в определенном на первой ступени преобразования узком амплитудном диапазоне. В других процедурах адаптации используется предварительный анализ характеристик ЭКС СВР и отдельных его элементов. Он включает в себя оценку амплитуды и формы предварительно регистрируемого кардиосигнала, что позволяет в реальном времени оптимально варьировать величины коэффициентов усиления и частотные характеристики различных каналов обработки сигналов в каждом из отведений с использованием обратной связи с выхода блока АЦП-ЦАП. Реализация процессов адаптации и их контроль происходят из персонального компьютера через шины обмена информацией и управления.

Первичная цифровая обработка ЭКС СВР

К следующему этапу реализации метода ЭКГ СВР отнесем процедуры первичной цифровой обработки сигналов. В частности, разработан комплекс методик, алгоритмов и программ, реализующих следующие процедуры: фильтрация сетевой помехи, стабилизация изоэлектрической прямой (изолинии), поиск характерных точек ЭКС, проведение спектрального анализа сигнала, а также его анализ методом гистограмм. В дальнейшем этот перечень процедур может быть расширен.

Для минимизации ошибок, влияющих на дальнейший анализ ЭКС, используется предварительная цифровая фильтрация сетевой помехи с частотой 50 Гц и ее гармоник, вызванных сетью переменного тока. Затем в комплексе следует процедура стабилизации изолинии, основанная на фильтрации низкочастотных помех, возникающих от биологического объекта исследования (дыхание, тремор мышц и т. п.) и искажающих ее.

Для исследования тонкой структуры ЭКС СВР важную роль играют разработанные отдельные процедуры выделения и локализации положения всех характерных точек ЭКС, их алгоритмическое и программное обеспечение. Они реализуют обнаружение и фиксацию положений как экстремумов отдельных зубцов и выбросов в каждом кардиоцикле, так и точек пересечения кардиосигнала с его изолинией. При дальнейшей разработке метода ЭКГ СВР выделение и локализация характерных точек являются важным инструментарием, позволяющим реализовать различные высокоточные процедуры вторичной цифровой обработки сигналов, связанные как с синхронизацией кардиосигналов, так и с выявлением диагностически значимых маркеров и признаков патологических процессов. Такие процедуры являются предметом отдельного исследования [5], [6].

Следующие этапы обработки ЭКС СВР основываются на использовании как классических статистических методов обработки сигналов, так и РЛ-технологий, позволяющих определить интересующие нас качественные и количественные характеристики исследуемых ЭКС со всех отведений и каналов блока. Среди них особое место занимают процедуры спект-

рального анализа (рис. 2) и построения гистограмм (рис. 3) ЭКС СВР. Отметим, что эти процедуры удалось практически использовать (внедрить) в процессе экспериментальных исследований кардиопатологий на животных [7]. Реализация процедуры спектрального анализа в рассматриваемом комплексе осуществляется посредством метода Уэльча. При дальнейших работах возможно внедрение и других методов спектрального анализа, подробно описанных в [8]-[10].

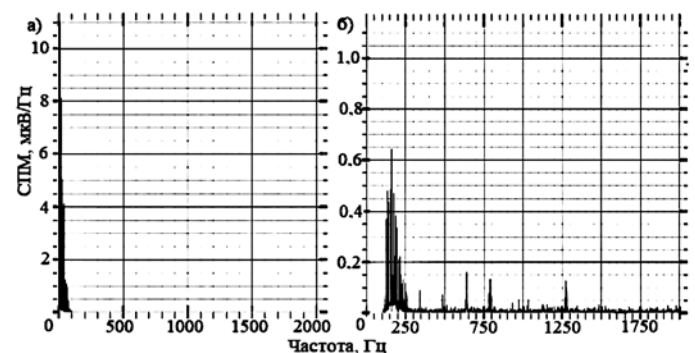


Рис. 2. Спектральная плотность мощности сигналов ЭКС СВР: а) в НЧ-канале; б) в ВЧ-канале

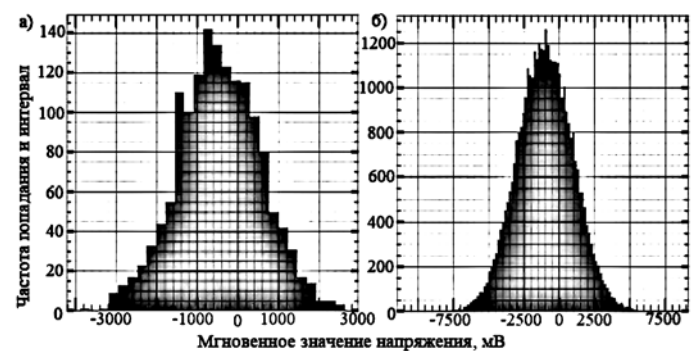


Рис. 3. Гистограммы ЭКС СВР: а) в НЧ-канале; б) в ВЧ-канале

Заключение

В настоящее время сотрудниками ИАП РАН и Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова» проводятся серии экспериментов на подопытных животных (крысах) по специально разработанной авторской методике [7]. В ходе этих экспериментов осуществляется моделирование ишемии миокарда, во время которого производятся записи ЭКС. В дальнейшем ведется исследование данных записей с применением изложенных в этой статье подходов, методов и алгоритмов.

Осуществлено внедрение процедур спектрального анализа и построения гистограмм ЭКС СВР в процесс проведения экспериментов по созданию искусственной ишемии у подопытных животных. Использование полученных в режиме реального времени характеристик по обеим указанным процедурам анализа текущих кардиосигналов позволяет контролировать и корректировать процесс развития данной патологии у животного, а именно производить в случае необходимости повторную окклюзию левой коронарной артерии [7]. Это позволяет уменьшить количество ошибок, которые приводят к неудачному окончанию эксперимента и потере дорогостоящего подопытного животного.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 18-29-02057 мк.

Список литературы:

1. Зайченко К.В. Радиозлектронные технологии в электрокардиографии сверхвысокого разрешения для ранней диагностики кардиопатологий // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. 2014. Т. 57. Вып. 11. С. 4-14.

2. *Zaichenko K.V., Zhmyleva A.A., Khrapov S.O., Logachev E.P., Gurevich B.S.* Application of modern technologies in new ultra high resolution electrocardiography method / IEEE Xplore library. Proceedings of 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBREIT). Yekaterinburg. 14-15 May, 2020. PP. 0004-0007.
3. *Аристархов Г.М., Гуляев Ю.В., Дмитриев В.Ф., Зайченко К.В., Комаров В.В. и др.* Фильтрация и спектральный анализ радиосигналов. Алгоритмы. Структуры. Устройства / Монография. Под ред. Ю.В. Гуляева. – М.: Радиотехника, 2020. 504 с.
4. *Зайченко К.В., Жмылева А.А., Устинова Д.М., Храпов С.О.* Радиолокационные методы обработки сигналов при реализации электрокардиографии сверхвысокого разрешения / XIV Международная научная конференция «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии – ФРЭМЭ'2020». Владимир-Суздаль. 1-3 июля 2020 г. Доклады, кн. 2. С. 134.
5. *Афанасенко А.С., Зайченко К.В., Кулыгина Л.А., Храпов С.О.* Выделение зубцов электрокардиосигнала при наличии фоновых помех / Научная сессия ГУАП; Сб. докл.: в 3-х ч. Ч. II. Технические науки. – СПб.: ГУАП, 2017. С. 31-35.
6. *Zaichenko K.V.* Problems of bioelectric signals synchronous analysis realization during their complete cycles / AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2140. P. 0200082.
7. *Зайченко К.В., Гуревич Б.С., Жмылева А.А., Князев А.А., Логачев Е.П.* Методика электрокардиографических исследований при проведении экспериментов по созданию искусственной ишемии у подопытных животных // Медицинская техника. 2019. № 4. С. 17-20.
8. *Зайченко К.В.* Информационная система съема и обработки сигналов с датчиков биоэлектрической активности живых систем // Датчики и системы. 2015. № 2. С. 52-56.
9. *Зайченко К.В., Гуревич Б.С.* Особенности спектральной обработки биоэлектрических сигналов // Медицинская техника. 2021 (в печати).
10. *Zaichenko K.V., Gurevich B.S.* Early diagnostics of ischemia by means of electrocardiographic signals processing using acousto-optic Fourier processors with time integration / Proceedings of SPIE. 2019. Vol. 11075. P. 110751U.

*Кирилл Вадимович Зайченко,
д-р техн. наук, профессор, зав. лабораторией,
лаборатория «Радио- и оптоэлектронные
приборы для биоинформационных
и геномных технологий ранней
диагностики патологий живых систем»,
Анна Алексеевна Кордюкова,
мл. научный сотрудник,
Евгений Павлович Логачев,
мл. научный сотрудник,
Мария Николаевна Лучкова,
инженер,
ФГБУН «Институт аналитического
приборостроения РАН»,
г. С.-Петербург,
e-mail: kvz235@mail.ru*

В.С. Медовый, Г.Д. Волков, Н.М. Стрела, И.В. Первушкин

Адаптирующийся лабораторно-облачный комбайн микроскопии

Аннотация

Рассмотрена конструкция комбайна микроскопии для автоматизации методик анализа биоматериалов. Комбайн имеет средства автоматической адаптации на всех этапах жизненного цикла: средства выбора комплектации для максимизации скоростей сканирования заданной группы методик анализа при производстве аппаратной части; средства выбора наиболее быстрого режима сканирования в зависимости от свойств анализируемого препарата; средства пополнения обучающей выборки изображений объектов анализа с использованием экспертной информации коллектива пользователей при разработке/модернизации автоматических анализаторов комбайна.

Введение

Применяющиеся при диагностике многочисленной группы патологий анализы морфологии микроскопических объектов биоматериалов относятся к группе наиболее трудных как для визуального анализа врачом, так и для разработки автоматического анализатора. Это связано со сложностью морфологии объектов, их высокой изменчивостью, многочисленностью типов, сходством признаков, наличием редких форм, не полностью контролируемым влиянием на морфологию технологий подготовки препаратов и другими факторами.

Первой проблемой при создании автоматического анализатора микроскопических препаратов является разработка его аппаратной платформы. Такая платформа должна работать быстро и формировать цифровые образы препаратов (ЦОП) разного разрешения в соответствии с набором задач микроскопии анализатора конкретного типа препарата. Известные скоростные медицинские сканирующие микроскопы [1]-[3] специализированы для формирования определенного типа ЦОП – «виртуального слайда» (ВС) – сплошной панорамы заданной области препарата. Формируются ВС узкого диапазона разрешений (в основном для гистологии), что не позволяет

использовать такие сканеры для решения всего набора задач автоматизации массовых методик анализа. Во многих случаях площадь препарата и время производства ВС на необходимом разрешении слишком велики, необходимы отдельные скоростные этапы обнаружения объектов на малом разрешении и анализа выборки объектов на большом разрешении. Современные универсальные моторизованные микроскопы могут образовывать комплектации для реализации такого рода производства разных типов ЦОП, однако из-за отсутствия критериев оптимизации платформы с такими микроскопами не гарантируют достаточную скорость производства ЦОП.

Второй ключевой проблемой создания автоматического анализатора микроскопических препаратов является необходимость формирования представительной обучающей выборки аттестованных препаратов биоматериалов для обучения анализатора. Из-за весьма большого объема такой выборки и отсутствия критериев представительности удлиняется период разработки и испытаний автоматического анализатора, остается неопределенной вероятность пропуска на испытаниях редких случаев. Проблемой является также необходимость адаптироваться к генеральной совокупности объектов анализа в течение жизненного цикла анализатора, что может быть