

Ю.М. СТАКЯН, Э.М. АЙКАЗЯН, М.З. ПОГОСЯН, Р.Э. ФАТЯН

**АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТНЫХ ПРОЦЕДУР В БИМЕДИЦИНСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ**

Представлен расчетный алгоритм и описана комплексная вычислительная программа для статистической обработки параметров электрокардиограмм (ЭКГ) при заболеваниях сердечно-сосудистой системы с целью создания автоматической системы диагностирования указанных заболеваний.

Ключевые слова: электрокардиограмма, фильтрация, сглаживание и распознавание ЭКГ, проверка нормальности распределения параметров, дисперсионный и регрессионный анализы данных, эталонные кривые ЭКГ.

При оценке состояния сердечно-сосудистой системы (ССС) ключевую роль играет анализ электрокардиограмм [1-3]. Проблема автоматической обработки и анализа ЭКГ сложилась в отдельное направление, которое разветвлено на множество частных задач, связанных с различными аспектами исследования ССС – длительный, непрерывный и автоматический контроль ЭКГ (холтеровский метод); системы для прикроватного и амбулаторного мониторинга ЭКГ; телеметрическая система для контроля состояния пациента; автономный контроль сердечной деятельности; функциональное исследование ССС; программное обеспечение и формализация биомедицинских процессов и др.

Автоматический анализ ЭКГ до настоящего времени представляет сложную проблему. Это, в первую очередь, связано с физиологическим происхождением электрокардиосигнала, который обусловлен разнообразием форм и видов сердечно-сосудистых заболеваний, выраженной стохастичностью и нестационарностью процесса, его подверженностью различным видам помех и шумов. Повышение эффективности видов автоматической обработки и анализа результатов кардиологических наблюдений связано с созданием надежных электронных систем обработки сигналов и наличием современных программных средств.

Для решения указанного комплекса задач на предварительном этапе программное обеспечение составляется таким образом, чтобы обеспечить высокую достоверность определения параметров ЭКГ: для зубцов – их амплитуды $h_1, \dots, h_5$ для интервалов комплекса $PQRST$ – их длительности $t_1, \dots, t_5$, T , а также $\sum t_i$.

Из всего многообразия заболеваний ССС выбрано наиболее распространенное – *гипертрофия миокарда*, используя базы данных медучреждений РА [4]. При наличии технологических и эксплуатационных возможностей кардиологической аппаратуры предпочтительно использовать два и более отведения ЭКГ. Для гипертрофии миокарда таковыми являются отведения I, II, AVL, V5 и V6, которые наиболее полно представляют особенности кардиологического проявления данного типа заболевания.

Комплексное статистическое исследование параметров ЭКГ для выбранного вида заболевания предполагает составление вариационных рядов и организацию 6-уровневых расчетных процедур по следующей схеме (рис. 1):

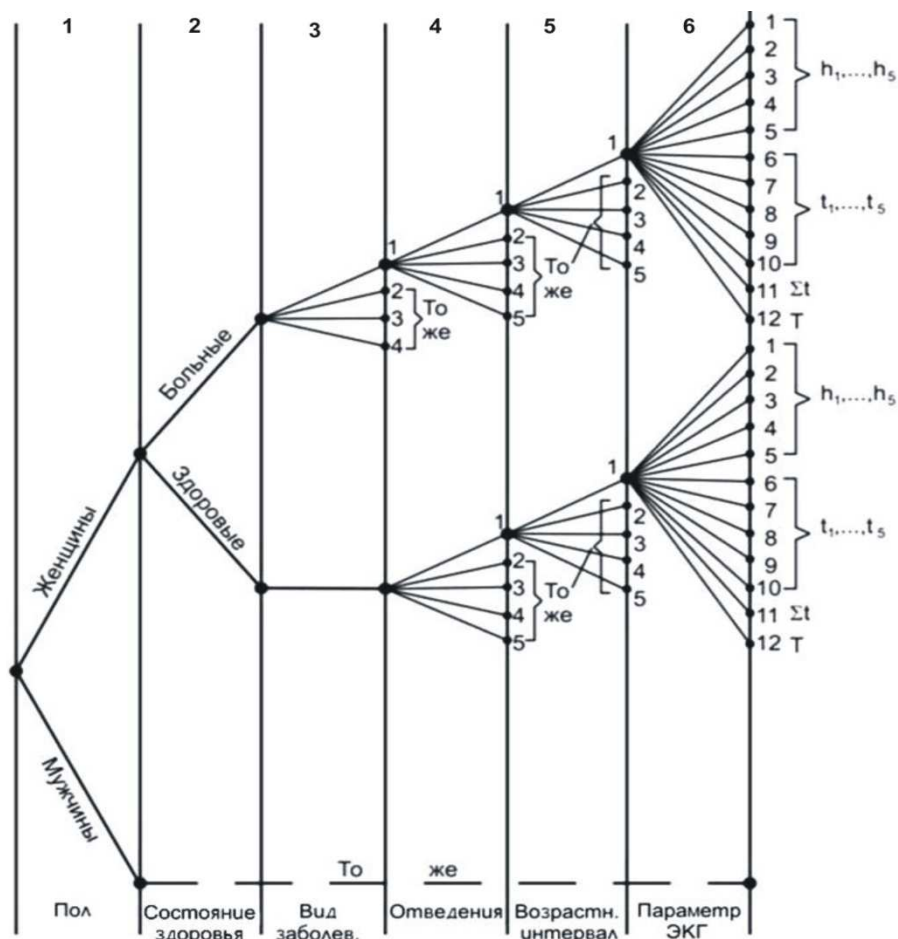


Рис. 1. Схема составления групп вариационных рядов для параметров ЭКГ

1 - по половому признаку (женщины и мужчины, две совокупности); 2 - по состоянию здоровья (больные и здоровые, две группы); 3 - по виду болезни (гипертрофия левого и правого предсердий и желудочков, 4 группы); 4 - по возрастному интервалу (5 подгрупп, [4]); 5 - по отведениям (I, II, AVL, V_5, V_6 , - 5 подгрупп); 6 - по параметрам ЭКГ указанных отведений ($h_1, \dots, h_5, t_1, \dots, t_5, T, \Sigma t$ - 12 подгрупп). Максимально возможное число вариационных рядов для изучения гипертрофии миокарда равно: для больных - $N_{1\max} = 2 \times 4 \times 5 \times 5 \times 12 = 2400$, для здоровых - $N_{2\max} = 2 \times 5 \times 5 \times 12 = 600$, всего: 3000 вариационных рядов.

Составлена комплексная вычислительная программа (рис. 2), которая включает разделы I-VII, разработанные как автономно действующие подпрограммы, введенные в единый вычислительный комплекс для автоматического диагностирования заболеваний ССС.

Рассмотрим указанные разделы.

I. Предварительная цифровая обработка ЭКГ составлена и реализуется модульным принципом.

1. *Модуль ввода и предварительной обработки данных.* Ввод данных осуществляется с использованием 12-канального АЦП, который позволяет ввести в память ЭВМ 12 независимых сигналов (отведений).

2. *Модуль фильтрации.* Источниками шумов, подлежащих фильтрации, являются: сетевые наводки с частотой 50, 60, 100, 120, 180 Гц; дрейф изолиний; контактный шум, вызванный неплотным прилеганием электродов; помехи от механических движений грудной клетки, мышечных сокращений и других причин; модуляция амплитуды, вызванная дыханием и др.

Задавая на входе модуля частоты подавления шума, тип фильтра и значения сигналов, на выходе получаем отфильтрованные сигналы ЭКГ.

3. *Модуль сглаживания.* Является специальной операцией усреднения с помощью интерполяционных полиномов. Последние обеспечивают получение точного значения по заданному y_i и передачу близлежащих значений y_{i-1}, y_i, y_{i+1} , известных со случайной погрешностью. Данный процесс осуществляется с помощью 3, 5, 7 и 9 точек. Обозначим исследуемый входной сигнал через $y_1, y_2, y_3, \dots, y_i, \dots, y_n$. Шаг дискретизации выбран $\Delta t = 2 \text{ мс}$. При линейном сглаживании по трем точкам новые значения отсчетов получают с помощью следующих формул:

$$\overline{y_0} = (5y_0 + 2y_1 - y_2)/6, \quad \overline{y_i} = (y_{0-i} + y_i + y_{i+1})/3, \quad \overline{y_n} = (5y_n + 2y_{n-1} - y_{n-2})/6, \quad (1)$$

где n - номер последней точки ординаты y_i , а сглаживание по пяти точкам проводится с использованием формул

$$\begin{aligned} \overline{y_0} &= (3y_0 + 2y_1 + y_2 - y_4)/5, \quad \overline{y_1} = (4y_0 + 3y_1 + 2y_2 + y_3)/10, \\ \overline{y_i} &= (y_{i-2} + y_{i-1} + y_i + y_{i+1} + y_{i+2})/5, \quad 2 \leq i \leq n-2, \\ \overline{y_{n-1}} &= (y_{n-3} + 2y_{n-2} + 3y_{n-1} + 4y_n)/10, \quad \overline{y_n} = (3y_{n-3} + 2y_{n-1} + y_{n-2} - y_{n-5})/5. \end{aligned} \quad (2)$$

Сглаживание по 7 и 9 точкам проводится с использованием аналогичных формул.

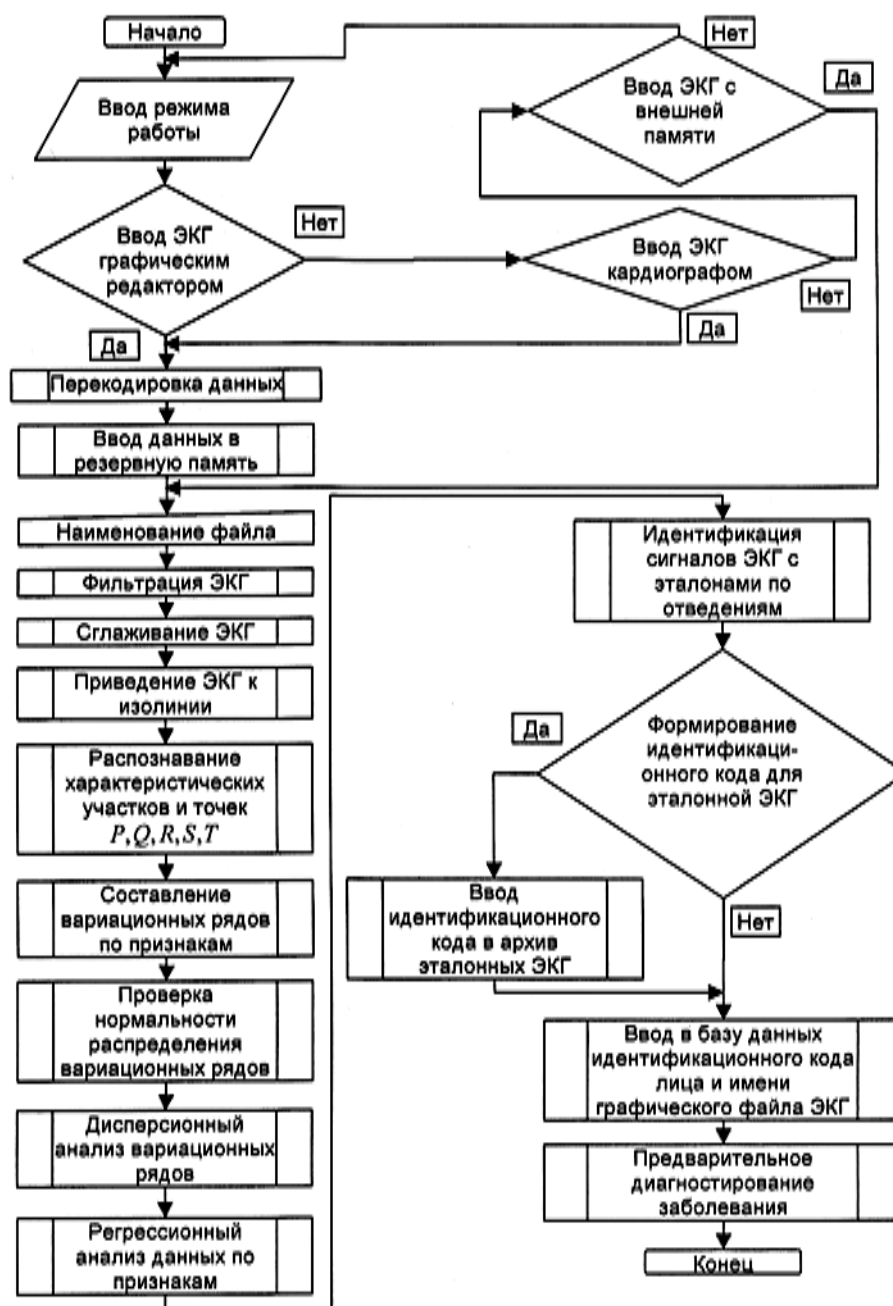


Рис.2. Схема алгоритма разработки ПО для автоматизированной обработки параметров ЭКГ

4. *Модуль приведения ЭКГ к изолинии.* С целью устранения дрейфа изолинии, сохранения нормального хода и характерных изменений ЭКГ, свойственных каждому виду и степени остроты сердечных заболеваний, а также точного расположения интервалов ЭКГ составлена подпрограмма, реализующая расчетно-графические процедуры по приведению ЭКГ к единой изолинии. Эти процедуры выполняются двумя этапами:

а) используя метод наименьших квадратов (МНК): $\sum_{j=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y}_{ij})^2 \longrightarrow \min$, определяют коэффициенты эмпирической линии регрессии для данного интервала ЭКГ:

$$\bar{y}_{ij} = a_{ij}t + b_{ij}, \quad (3)$$

$$\text{где } a_{ij} = \left(\sum_{i=1}^{n_j} y_{ij} \sum_{i=1}^{n_j} t_{ij} - n_j \sum_{i=1}^{n_j} y_{ij} t_{ij} \right) / \left(\left(\sum_{i=1}^{n_j} t_{ij} \right)^2 - n_j \sum_{i=1}^{n_j} t_{ij}^2 \right), \quad b_{ij} = \sum_{i=1}^{n_j} \left(y_{ij} - a_{ij} \sum_{i=1}^{n_j} t_{ij} \right) / n_j,$$

n_j - число точек дискретизации внутри j -го интервала;

б) создают систему уравнений кусочно-линейных функций (3) и последовательно, шаговым способом присоединяют их друг к другу на координатной оси t , приводя их в единую изолинию.

5. *Модуль распознавания параметров ЭКГ.* Предусматривает определение параметров y_i, t_i ЭКГ в комплексе $PQRST$: точек экстремумов, перегибов, пересечений с изолинией, а также зубцов всех интервалов. По результатам опознанных точек определяются амплитуды и временные показатели, необходимые для диагностики заболеваний. Иногда, если сигнал сильно зашумлен или по каким-либо причинам не удастся распознать его характерные точки, то выдается сообщение о зашумленности сигнала, производится его очистка и дается разрешение на ввод нового сигнала.

II. Создана система кодирования, которая позволяет составлять совокупности, группы и подгруппы пациентов по вышеуказанным шести признакам (рис. 1), формировать отдельные выборки и вариационные ряды параметров.

III. Для проверки нормальности распределения предварительно определяются статистические параметры вариационных рядов и выполняются следующие процедуры [5]:

а) выборы оптимального числа разбивки размаха варьирования вариационного ряда и оптимальной преобразующей функции $v_{onm} = f(x)$ данных, обеспечивающих максимальный уровень надежности вывода $\alpha_{\max}$, который получается из условия $\chi^2 \leq \chi^2_{\alpha}$ согласно критерию Пирсона χ^2 ;

б) графическая проверка нормальности распределения рядов посредством построения и сравнения эмпирических и теоретических функций распределения (дифференциальной, интегральной и нормированной линий);

в) переход к начальной координатной системе (x, y) для практического применения результатов графических построений и составление таблиц вероятностных значений параметров ЭКГ.

IV. В рамках однофакторного дисперсионного анализа данных производятся следующие расчетные процедуры [4]: составление групп вариационных рядов и предварительная проверка однородности дисперсий по критерию Бартлетта; расчет межрядовой и внутрирядовой дисперсий для группы вариационных рядов и проверка однородности дисперсий по критерию Фишера; расчет обобщенных статистических показателей для группы рядов и определение их 90%-ых доверительных интервалов; объединение или перегруппировка вариационных рядов с учетом однородности дисперсий и уровня значимости исследуемого фактора.

V. Для количественной оценки влияния исследуемого фактора на параметры ЭКГ составляются совокупности двумерных данных (x_i, y_i) и в рамках регрессионного анализа выполняются следующие процедуры [6]: выбор оптимальной преобразующей (линеаризующей) системы координат (u, v) , обеспечивающей максимальное значение выборочного коэффициента корреляции $r_{\max}$; проверка наличия корреляционной связи согласно ранговому коэффициенту корреляции Спирмена; определение параметров медианной линии регрессии и проверка их статистической значимости; определение параметров уравнения семейства квантильной линии регрессии и переход к начальной координатной системе (x, y) .

VI - VII. Выполненные статистические вычисления позволяют составить вероятностные таблицы значений эталонных параметров ЭКГ, соответствующих уровням вероятности $P(x) = 50, 70, 90, 95, 97$ и 99% для каждого вида рассмотренного заболевания и с учетом указанных шести признаков, а по этим значениям формируют квантильные эталонные ЭКГ. Для идентификации параметров ЭКГ пациента с соответствующими эталонными значениями выполняются следующие расчетно-графические процедуры:

- а) используя сплайн-метод, составляется полином m -степени для характеристических точек $(t_1, \dots, t_5, h_1, \dots, h_5)$ эталонной ЭКГ, который фактически является математической моделью этой ЭКГ, а его коэффициенты – идентификационными кодами эталона и хранятся в базе данных программы;
- б) производится предварительная цифровая обработка параметров ЭКГ пациента согласно разделу I, составляется аналогичный полином, определяются его коэффициенты, и их сравнивают с идентификационными кодами эталона;
- в) по уточненным параметрам составляют обобщенную ЭКГ пациента, которую графически сравнивают с семейством квантильных эталонных ЭКГ;
- г) производят предварительную диагностику заболевания с определенным уровнем вероятностной оценки.

Учитывая сравнительно большой спектр и разнообразие проявлений заболеваний ССС, предполагается выполнение аналогичных математико-статистических исследований и заполнение базы данных материалами и для других видов рассматриваемого класса заболеваний.

Создание и внедрение прикладных программных средств, реализующих алгоритмы анализа ЭКГ, позволят их использовать в приборах и системах кардиологического наблюдения, а также обеспечат точность и достоверность формируемых диагностических заключений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шакин В.В.** Вычислительная электрокардиография. – М.: Наука, 1981. – 166с.
2. **Манило Л.А.** Автоматический анализ электрокардиосигнала в задачах распознавания нарушений сердечного ритма // Сб.: Биотехн. системы в медицине и биологии. – СПб: Политехника, 2002. – С.61-68.
3. Пакет программ для функциональных электрокардиографических исследований / **А.Н. Калиниченко, А.П. Немирко, П.В. Мурашов** и др. // Изв. СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. Сер. Биотехн. сист. в мед. и экол. – 2004. – Вып.1. – С.36-39.
4. **Стакян Ю.М.** Расчёт статистических характеристик параметров ЭКГ и их дисперсионный анализ // Вестн. ИАА. – 2008. – Т.5, №3. – С. 413-419 .
5. **Стакян Ю.М.** Алгоритм вероятностной оценки параметров электрокардиограмм (ЭКГ). Сообщ. 1. Проверка “нулевой” гипотезы соответствия нормальному распределению параметров ЭКГ // Вестн. ИАА. – 2007. – Т.4, №4. – С.652-657.
6. **Стакян М.Г., Манукян М.А., Маркарян А.Г.** Статистические методы обработки результатов механических испытаний // Вестн. ИАА. – 2004. – Т.1, №1. – С.83-90.

ГИУА(П).

Материал поступил в редакцию 02.09.2009.

Յու.Մ. ՍՏԱԿՅԱՆ, Է.Մ. ՀԱՅԿԱԶՅԱՆ, Մ.Զ. ՊՈԴՈՍՅԱՆ, Ր.Է. ՖԱՏՅԱՆ

ՀԱՇՎԱՐԿԱՅԻՆ ԸՆԹԱՑԱԿԱՐԳԵՐԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՑՈՒՄԸ ԿԵՆՍԱԲԺՇԿԱԿԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՒՄ

Ներկայացված է հաշվարկային ալգորիթմ և նկարագրված է համալիր համակարգչային ծրագիր սրտանոթային համակարգի հիվանդությունների դեպքում էլեկտրասրտագրերի (ԷՍԳ) պարամետրերի վիճակագրական մշակման համար, որի նպատակն է ստեղծել նշված հիվանդությունների ախտորոշման ավտոմատ համակարգ:

Առանցքային բառեր. Էլեկտրասրտագիր (ԷՍԳ), ԷՍԳ-ի ֆիլտրում, հարթեցում և ճանաչում, պարամետրերի նորմալ բաշխման ստուգում, տվյալների ցրվածքային և հետընթացային վերլուծություններ, ԷՍԳ-ի չափանմուշային կորեր:

Yu.M. STAKYAN, E.M. HAYKAZYAN, M.Z. POGHOSYAN, R.E. FATYAN

DESIGN PROCEDURE AUTOMIZATION IN BIOMEDICAL INVESTIGATIONS

A design algorithm is presented and a complex computer program for statistical processing of electrocardiogram (ECG) parameters in cardiovascular system (CVS) diseases is described. It is done for developing an automatic system of diagnosing these diseases.

Keywords: electrocardiogram (ECG), filtration, smooting and recognising of ECG, parameter distribution normality correction, dispersion and regression data analyses, standard ECG curves.