

exploratory study // Int. J. Human-Computer Studies. Oct. 2009. Vol. 67, Iss. 10. P. 870–886.

5. Bakhtiyari K., Husain H. Fuzzy model on human emotions recognition // Recent advances in electrical and computer engineering. 12th WSEAS Intern. conf. on Applications of Computer Engin. (ACE '13), Cambridge, MA, USA, 30 Jan. – 1 Feb. 2013. Cambridge, 2013. P. 77–82.

6. Epp C., Lippold M., Mandryk R. L. Identifying emotional states using key-stroke dynamics // CHI 2011, Vancouver, BC, Canada, May 7–12, 2011. Vancouver, 2011. P. 715–724.

7. Identifying emotion by keystroke dynamics and text pattern analysis / A. F. M. N. H. Nahin, J. M. Alam,

H. Mahmud and K. Hasan // Behav. & Inform. Technol. 2014. Vol. 33, № 9. P. 987–996.

8. Пат. США № US 6,190,314 B1. W. S. Ark, D. C. Dryer. Computer input device with biosensors for sensing user emotions // Appl. № 09/ 116,063. Feb. 20, 2001.

9. Пустозеров Е. А. Разработка метода обработки и анализа результатов эксперимента для выявления устойчивых признаков психофизиологического состояния оператора ПК по параметрам, характеризующим его работу с клавиатурой // Технологии товародческой, таможенной и криминалистической экспертизы: сб. науч. тр. № 5 в 2 ч. СПб.: Изд-во СПбГЭУ. 2014. С. 174–183.

M. B. Leonova, E. A. Pustozarov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE ESTIMATION METHODS BASED ON THE ANALYSIS OF MOUSE AND KEYBOARD PARAMETERS OF HUMAN OPERATOR

Offers an overview on emotions, stress, and fatigability estimation methods based on mouse and keyboard monitoring of human operator. Current studies present a comparative analysis of different approaches and emphasis perspective trends of human operator psychophysiological state analysis.

Human controller, fatigability, stress, keyboarding, monitoring

УДК: 615.47:621.37.39+519.711.3

Э. П. Тихонов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Концептуальная модель предметной области автоматической фрагментации электрокардиосигналов на базе логической схемы алгоритмов

Разработана и представлена концептуальная модель предметной области синтеза алгоритмов автоматической фрагментации основных электрофизиологических показателей при анализе электрокардиограмм на основе информации, полученной в этой сфере в течение прошлых десятилетий. Разработанный подход ориентирован на повышение эффективности использования накопленного информационного ресурса (знания) в области автоматической диагностики для дальнейшего совершенствования и развития методов и средств автоматизации медицинской диагностики.

Электрокардиосигнал, предметная область, алгоритм, автоматическая фрагментация, логическая схема алгоритмов, оператор

Перманентно совершенствующиеся электронные средства, особенно аналого-цифровые микропроцессорные системы, создают предпосылки для разработки разнообразных методов, порождающих

соответствующие алгоритмы и, соответственно, способы определения (обнаружения, оценки, выделения, измерения) амплитудных и временных параметров фрагментов электрокардиосигналов

(ЭКС), например таких, как амплитуды зубцов R, T, P, Q, S и временные длительности QRS-комплексов, RR-интервалов, ST-сегментов, а также их форм, определяемых тем или иным способом. В свою очередь, на базе достигнутых успехов в области автоматического определения параметров и форм фрагментов ЭКС или, кратко, автоматической фрагментации ЭКС [1]–[7] интенсивно развиваются методы и, следовательно, алгоритмы и способы автоматизации диагностики нозологических состояний пациента, в том числе и на основе мониторинга, включая и системы прикроватного мониторинга, используемого в палатах интенсивной терапии и реанимационных отделениях [8]. Очевидно, что автоматическая фрагментация ЭКС и автоматизация диагностики нозологических состояний пациента в силу использования совершенно отличных знаний, включающих соответствующие методы, процедуры, алгоритмы, по существу представляют собой разные предметные области (ПрО), но вторая ПрО полностью зависит от первой и, прежде всего, от достоверности автоматической фрагментации ЭКС. Обе ПрО объединяет также то, что результаты решения задач в первой служат исходными для поиска решений соответствующих проблем во второй. Если автоматическая фрагментация связана с измерением или объективной количественной информацией, желательно с установленной погрешностью, оценкой соответствующих признаков и параметров ЭКС (зубцы или волны R, T, P, QRS-комплексы, интервалы RR, PQ, PR, ST, QRS и т. д.), то при автоматизации диагностики нозологических состояний пациента основную роль играет оценка влияния тех или иных патологий на изменение этих признаков или параметров фрагментов ЭКС на основе врачебной практики. Напомним, что оценка тех или иных геометрических форм или параметров фрагментов отличается от результатов их измерения только установленным порогом допустимой погрешности (для оценки этот порог превышает 10 %). В любом случае, дополнительная числовая и графическая обработка информации о фрагментах ЭКС для постановки окончательного диагноза должна содержать определенные требования, аналогичные требованиям к косвенным и совместным измерениям [9]. В противном случае постановка диагноза может быть ошибочной из-за получения ложной информации или вес объективно полученной информации будет существенно ниже по сравнению с субъективным мнением врача. Вместе с тем,

любая объективно полученная информация независимо от погрешности ее получения снижает начальную неопределенность и повышает достоверность идентификации или диагностики, причем уровень снижения этой неопределенности зависит от погрешности при объективном получении информации в результате применения технических средств.

Объектами дальнейшего анализа в пределах ПрО автоматической фрагментации служат алгоритмы обнаружения и количественной оценки параметров фрагментов ЭКС, так как обычно способ направлен на реализацию соответствующего алгоритма электронными средствами. Вопрос, связанный с использованием терминов «определение» (оценка) или «измерение» фрагментов биомедицинских сигналов остается за рамками статьи ввиду того, что во всех анализируемых работах (кроме тех, где измерения фрагментов вручную осуществляются в миллиметрах по бумажному носителю ЭКС) авторы стараются избегать применения термина «измерение». И это не случайно, так как прямые измерения осуществляется только при аналого-цифровом преобразовании ЭКС, т. е. при преобразовании непрерывного ЭКС, поступающего с электродов-датчиков, в цифровую последовательность в условиях воздействия помех с фиксированным временным интервалом дискретизации. Параметры фрагментов ЭКС если и измеряются, то только косвенно, т. е. за счет дополнительной и, для аналого-цифровых микропроцессорных систем, программной обработки результатов аналого-цифрового преобразования ЭКС. Проблема метрологии для обоснования измерения фрагментов (параметров, характеристик) биомедицинских сигналов, имеющих свою специфику при воздействии помех, в настоящий момент разработана очень слабо, в том числе из-за отсутствия специальных государственных служб метрологического надзора, характерного, например, для электрических измерений [9], [10]. Тем не менее, в последнее время появились работы, в частности [11], в которых предлагается система оценки качества ЭКС по базе экспериментальных данных ЭКС в соответствии с сигналами Physionet Challenge 2011 Set-A и Set-B, проанализированных и предложенных специалистами Массачусетского технологического университета (США) в рамках конкурса Physionet Challenge 2011.

При наличии в научно-технических публикациях и патентах большого объема информации о различных методах, алгоритмах и, следовательно,

о способах автоматического определения тех или иных фрагментов ЭКС становится актуальной постановка следующих задач: в первую очередь, сравнение между собой алгоритмов автоматического определения фрагментов ЭКС; во вторую – поиск обоснованных, компактных, легко обозримых методов и, тем самым, критериев сравнения разработанных и вновь разрабатываемых алгоритмов и способов решения поставленной проблемы. Напомним, что алгоритм – это некоторое предписание, определяющее последовательность действий, которая, исходя из некоторого исходного значения, приводит к определенному конечному результату. Необходимость в разработке несмотря на все трудности поставленной проблемы обоснованных методов сравнения диктуется как требованием сравнения известных и вновь разрабатываемых методов, алгоритмов и, следовательно, способов автоматического определения фрагментов ЭКС, так и решением задач автоматического выбора совокупности определяемых фрагментов с учетом требуемого объема информации при постановке соответствующего диагноза.

В существующих обзорах методов и алгоритмов, например обнаружения QRS-комплексов или R-зубцов ЭКС (см., напр., [2], [12]–[19]) с последующей оценкой или измерением RR-интервалов, представленный сравнительный анализ носит описательный характер преимущественно на естественном языке, который дает только предпосылки для обоснованного и компактного формального метода представления различных алгоритмов. Рассматриваемая в этих работах преимущественно вербально-эвристическая форма описания, представления и анализа алгоритмов носит декларативный характер, а значит, допускает неоднозначность толкования отдельных предписаний, преобразований и последовательности их выполнения, что существенно затрудняет задачу объективного количественного выделения отличительных признаков и сравнения между собой различных алгоритмов в соответствии с установленным критерием. Кроме того, в интенсивно развивающемся новом направлении по созданию систем искусственного интеллекта [20] основополагающей становится проблема построения баз знаний онтологического типа как общего характера, так и применительно к конкретной ПрО. К этому направлению можно отнести и работу [10], в которой рассматривается задача метрологического синтеза – формирования алгоритма измерений, удовлетворяющего заданным требованиям, поис-

ком отображения накопленных априорных знаний в оптимальный алгоритм измерения. В рассматриваемом случае методы и алгоритмы автоматического определения или измерения фрагментов ЭКС (фрагментация ЭКС), ввиду важности решения данной проблемы и большого объема накопленной информации в этом направлении в виде априорных знаний, целесообразно анализировать как отдельную ПрО, выделив ее из общей ПрО автоматизации диагностики по электрофизиологическим показателям.

Цель исследования и постановка задачи.

Основная цель работы – унификация описания, а также интеграция в рамках формирования априорных знаний по представленной в различных источниках разнородной информации на базе логической схемы алгоритмов (ЛСА) [21], [22] для сравнения и поиска в установленном смысле оптимальных в условиях воздействия помех алгоритмов фрагментации ЭКС. Результаты представленной работы используются в последующих частях настоящей работы для выполнения спецификации операторов и алгоритмов автоматической фрагментации на основе обзора и морфологического анализа существующих методов и алгоритмов фрагментации ЭКС в аналого-цифровых медико-биологических системах. По существу речь идет о разработке спецификации концептуализации (абстрактного представления) [20] ПрО автоматической фрагментации, создающей предпосылки для ее описания в виде онтологии на базе формального языка ЛСА.

Решение задачи. Известно, что в общем случае алгоритм обладает рядом свойств, к которым относится свойство дискретности, на основе которого и была разработана система ЛСА [21], состоящая из последовательности операторов, реализующих некоторые элементарные действия (преобразования, функции, акты) и нумерованных стрелок, расставленных в соответствии с порядком действия алгоритма. Последовательное выполнение нескольких операторов записывается как их произведение. Оператор, стоящий справа, действует после оператора, стоящего слева. Очевидно, что при формализации известных алгоритмов автоматического определения фрагментов ЭКС элементарные действия целесообразно сгруппировать и объединить в отдельные операторы, которые выполняют заданное преобразование (функцию), представляющее собой некоторый отдельный укрупненный акт формализуемого алгоритма. Установленная последовательность опера-

торов вместе с логическими условиями по существу и определяет формальную запись алгоритма в рамках ЛСА. Причем в соответствии с логическими условиями либо изменяется последовательность выполняемых операторов передачей действия от некоторого исходного оператора другому оператору, либо фиксируется искомый результат или промежуточное событие, подсчет которого приводит к искомому результату. В алгоритмах фрагментации ЭКС используется, как правило, комбинация всех перечисленных условий. Принимается, что если проверяемое логическое условие выполнено или равно единице, то действует следующий оператор справа. Если же логическое условие не выполнено, что соответствует событию, равному нулю, то действие передается оператору по указанию стрелки.

Для формального описания алгоритмов фрагментации ЭКС в условиях воздействия помех на базе ЛСА в рассматриваемой ПрО необходимо установить группу (множество) операторов и указать связи между ними на основе анализа априорных знаний, включающих множество известных методов и алгоритмов измерения тех или иных фрагментов ЭКС. Иначе говоря, необходимо структурировать известные алгоритмы, которые разработаны или синтезированы преимущественно на основе эвристических подходов. Для формального обоснования возможности синтеза алгоритмов на основе накопленных априорных знаний обратимся к подходу, разработанному в рамках искусственного интеллекта [20], в основе которого положено понятие концептуальной (понятийной) модели ПрО. В настоящей работе ПрО является автоматическая фрагментация ЭКС с учетом реальных условий получения информации, концептуальная (понятийная) модель которой КМПРО_{<АФ>} согласно [20] структурируется в виде

$$\text{КМПРО}_{\langle\text{АФ}\rangle} = \langle \mathbf{X}, \mathbf{C}_x, \mathbf{O}, \mathbf{OP}, \mathbf{\Theta}, \mathbf{\Phi}_p, \mathbf{C}_\Phi \rangle, (1)$$

где $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ – множество знаков (имен), описывающих ЭКС от различных отведений, а также воздействующих на ЭКС составляющих помех (сетевая, случайная общего вида, триммер мышц); $\mathbf{C}_x = (C_{x1}, C_{x2}, \dots, C_{xk})$ – множество имен, описывающих свойства, характеристики и параметры сигналов и помех, т. е. их концепты, в виде диапазонов изменения по уровню и частоте ЭКС, характера изменения ЭКС и помехи во времени (квазислучайность и квазипериодичность), вид случайного процесса, описывающего случайную составляющую помехи, амплитуды

зубцов и пределы изменения их временной длительности, и т. д.; $\mathbf{O} = (O_1, O_2, \dots, O_l)$ – множество имен отношений между элементами множества X , например взаимодействие сигнала и составляющих помех: аддитивно или (и) мультипликативно, порядок следования фрагментов (например, фрагмент или волна Т следует за QRS-комплексом, а волна Р предшествует QRS-комплексу) и т. п.; $\mathbf{OP} = (OP_1, OP_2, \dots, OP_d)$ – множество имен действий или преобразований, в рассматриваемом случае операторов, которые допустимы над элементами множества X с учетом свойств его составляющих и отношений между ними; $\mathbf{\Theta}$ – множество подмножеств операторов \mathbf{OP} , образующих алгоритмы автоматической обработки ЭКС в соответствии с поставленной целью и формально представленных в виде составляющих вектора $\mathbf{\Theta} = (\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_r)$; $\mathbf{\Phi}_p = (\Phi_{p1}, \Phi_{p2}, \dots, \Phi_{ps})$ – множество имен искомых фрагментов (удобно использовать дескрипцию в виде принятых символов: зубцы R, T, P или волны; QRS-комплексы; RR-, PQ-, PR-, ST-, QRS-интервалы; R_A-, T_A-, P_A-амплитуды, и т. д.), получаемых в результате действия алгоритмов в виде подмножеств от общего перечня; $\mathbf{C}_\Phi = (C_{\Phi1}, C_{\Phi2}, \dots, C_{\Phi g})$ – множество, задающее свойства и характеристики искомых фрагментов, в основном касающиеся достоверности или точности их получения.

Множество $\mathbf{\Theta}$ подмножеств \mathbf{OP} определяет множество алгоритмов в виде составляющих вектора $\mathbf{\Theta}$, каждый из которых состоит из композиции составляющих вектора \mathbf{OP} и потенциально обеспечивает решение поставленной задачи автоматической фрагментации ЭКС. Варианты постановки задач фрагментации ЭКС зависят от установленной цели исходной задачи по автоматической фрагментации ЭКС, например определения RR-интервалов ЭКС за заданный промежуток времени или определения RR-интервалов, амплитуд R-зубца, длительностей QRS-комплекса, и т. д.

Структурированное описание (1) статично, тогда как множество X должно описывать реальные объекты в привязке к дискретным моментам $i\Delta t$ ($i = 1, 2, \dots, \Delta t = \text{const}$) выполнения функции аналого-цифрового преобразования составляющих вектора X , следующих через интервал дискретизации Δt , так как ЭКС и помехи изменяются во времени. В эти же моменты могут фиксироваться изменения и в других компонентах КМПРО (1), хотя в последнем случае требуется дополнительный анализ для выявления динамики указанных в (1) составляющих векторов. Так,

ввиду случайного или квазислучайного характера изменения составляющих вектора \mathbf{X} вектор, описывающий их концепты, также зависит от времени в привязке к дискретным моментам $i\Delta t$. Однако некоторые составляющие векторов \mathbf{O} , \mathbf{OP} , $\mathbf{\Theta}$ по существу практически не зависят от времени, тем не менее с учетом охвата КМПРО множества адаптивных алгоритмов, использующих изменяющиеся (приспосабливающиеся) во времени операторы, целесообразно воспользоваться представлением (1) в уточненном виде:

$$\text{КМПРО}_{\langle A\Phi\Delta t \rangle} = \langle \mathbf{X}(i\Delta t), \mathbf{C}(i\Delta t), \mathbf{O}(i\Delta t), \mathbf{OP}(i\Delta t), \mathbf{\Theta}(i\Delta t), \mathbf{\Phi}_p, \mathbf{C}_\Phi(i\Delta t) \rangle, i = 1, 2, \dots \quad (2)$$

В дальнейшем предполагается, что составляющие вектора \mathbf{X} получены с ориентацией на их дальнейшую обработку в электронных системах, обработка информации в которых с целью автоматической фрагментации ЭКС реализуется в цифровом виде, например на основе микропроцессоров, микроконтроллеров или иных цифровых электронных средств. Вследствие этого все составляющие вектора \mathbf{X} получены исходя из предварительного выполнения измерительной процедуры ЭКС, которая формально с учетом аналого-цифрового преобразования описывается в виде следующего уравнения измерения, принятого в соответствии с [10] в виде

$$\mathbf{X}_ц(i\Delta t) = \mathbf{R}_{АЦ}, \dots, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_1 \mathbf{X}(i\Delta t), \quad (3)$$

где $\mathbf{X}_ц(i\Delta t)$ – результат аналого-цифрового преобразования (измерения) входного сигнала $\mathbf{X}(i\Delta t)$ в дискретные моменты времени $i\Delta t$ при $i = 1, 2, 3, \dots$; $\mathbf{R}_{АЦ}, \dots, \mathbf{R}_2, \mathbf{R}_1$ – операторы, реализующие предварительные преобразования включая оператор аналого-цифрового преобразования $\mathbf{R}_{АЦ}$.

К операторам, предшествующим аналого-цифровому преобразованию, относятся, например, операторы, описывающие функцию датчиков съема информации в виде ЭКС, усиления, различных видов аналоговой фильтрации.

В настоящее время существует большое количество способов определения отдельных фрагментов ЭКС, например временное положение QRS-комплексов, основанных только на аналоговой обработке сигналов, исключающих применение оператора $\mathbf{R}_{АЦ}$ (см. напр., [23]). Построение КМПРО на базе формального языка ЛСА для этого случая требует отдельного рассмотрения.

С учетом (3) КМПРО (2) преобразуется к виду

$$\text{КМПРО}_{\langle A\Phi\Delta t \rangle} = \langle \mathbf{X}_ц(i\Delta t), \mathbf{C}_ц(i\Delta t), \mathbf{O}_ц(i\Delta t), \mathbf{OP}_ц(i\Delta t), \mathbf{\Theta}_ц(i\Delta t), \mathbf{\Phi}_{p.ц}, \mathbf{C}_{\Phi.ц}(i\Delta t) \rangle, \quad (4)$$

т. е. все составляющие описываются в виде поименованных числовых последовательностей.

Отметим, что в общем случае искомое множество составляющих векторного оператора является открытым, так как появление нового алгоритма может быть основано не только на изменении порядка выполняемых составляющих оператора и логических условий, а еще и на использовании новых составляющих, возникающих в связи с разработкой нового метода обнаружения того или иного фрагмента ЭКС. Кроме того, следует добавить, что составляющие вектора оператора при выполнении одной и той же основной функции обычно состоят из различных последовательностей элементарных действий, реализуемых соответствующими электронными или программными компонентами и, в свою очередь, могут быть описаны в соответствии с концептуальной моделью (4). Если различия между элементарными действиями составляющих вектора оператора значимые, то в этом случае рассматриваемый оператор выделяется в виде отдельной модификации с самостоятельной дескрипцией и может служить основанием для синтеза нового алгоритма фрагментации ЭКС. Например, общая функция фильтрации может иметь различные модификации и даже типы, реализуемые в виде фильтров нижних и верхних частот (ФНЧ и ФВЧ), полосовых фильтров (ПФ) соответствующего порядка, режекторного фильтра (РЖ). При этом способ реализации – аналоговый или цифровой, например при их использовании в одном и том же алгоритме, также может выделяться в виде отдельного оператора, если исключение одного из них не компенсируется улучшением характеристик другого. Однако цифровые фильтры, реализующие тот или иной метод фильтрации, к примеру по Чебышеву или Бесселю, нецелесообразно выделять в виде соответствующей модификации, точно так же, как и при повышении их порядка, когда при замене вида фильтров не достигается принципиальное и очевидное улучшение соответствующих характеристик по результатам применения соответствующей модификации алгоритма.

В принципе КМПРО (4) можно упростить, если принять во внимание тот факт, что при реализации всех известных алгоритмов автоматической фрагментации ЭКС составляющие векторов $\mathbf{C}(i\Delta t)$ и $\mathbf{O}(i\Delta t)$ совпадают, поэтому для описания содержательной КМПРО достаточно ее показать при отмеченном условии в виде

$$\text{КМПРО}_{\langle A\Phi\Delta t \rangle} = \langle \mathbf{X}_ц(i\Delta t), \mathbf{OP}_ц(i\Delta t), \mathbf{\Theta}_ц(i\Delta t), \mathbf{\Phi}_{p.ц}, \mathbf{C}_{\Phi.ц}(i\Delta t) \rangle, \quad (5)$$

где каждая из составляющих вектора оператора $\mathbf{OP}_{\Pi}(i\Delta t)$ в свою очередь может быть представлена в соответствии со следующей КМПРО $\langle \mathbf{OP}_{\Pi}(i\Delta t) \rangle$

$$\mathbf{КМПРО}_{\langle \mathbf{OP}_{\Pi}(i\Delta t) \rangle} = \langle \mathbf{X}_{\Pi, \text{вх.оп}}(i\Delta t), \mathbf{C}_{\Pi, \text{э}}(i\Delta t), \mathbf{O}_{\Pi, \text{э}}(i\Delta t), \mathbf{OP}_{\Pi, \text{э}}(i\Delta t), \mathbf{\Theta}_{\Pi, \text{э}}(i\Delta t), \mathbf{Y}_{\Pi, \text{вых.оп}}(i\Delta t) \rangle, \quad (6)$$

В равенстве (6) фактически сохраняются почти все поименованные в (4) компоненты, но с другим содержанием элементарных действий, которые лежат в основе формирования соответствующих операторов – компонентов векторов, входящих в (4) и представляющих в этом случае верхний уровень иерархического описания КМПРО.

Автоматизация диагностики нозологических состояний пациента по фрагментам ЭКС может быть описана в виде следующей КМПРО:

$$\mathbf{КМПРО}_{\langle \mathbf{AD}_{\Pi} \Delta t \rangle} = \langle \mathbf{\Phi}_{\text{р.}\Pi}(i\Delta t), \mathbf{C}_{\text{ф.}\Pi}(i\Delta t), \mathbf{O}_{\text{ф.}\Pi}(i\Delta t), \mathbf{OP}_{\text{ф.}\Pi}(i\Delta t), \mathbf{\Theta}_{\text{ф.}\Pi}(i\Delta t) \rangle, \quad (7)$$

где $\mathbf{\Phi}_{\text{р.}\Pi}(i\Delta t)$ – вектор фрагментов, полученный в результате автоматической фрагментации ЭКС; $\mathbf{C}_{\text{ф.}\Pi}(i\Delta t)$ – вектор, описывающий свойства, характеристики и параметры фрагментов, необходимых для диагностики; $\mathbf{O}_{\text{ф.}\Pi}(i\Delta t)$ – вектор, описывающий отношения между параметрами и характеристиками компонентов вектора фрагментов; $\mathbf{OP}_{\text{ф.}\Pi}(i\Delta t)$ – вектор операторов преобразования компонентов вектора фрагментов (операторы определения вероятностных характеристик значений параметров фрагментов и их количественная оценка, операторы нелинейных преобразований и т. д.); $\mathbf{\Theta}_{\text{ф.}\Pi}(i\Delta t)$ – вектор, описывающий имена возможных вариантов диагноза на основе накопленных априорных знаний.

Очевидно, что на основе (7) может быть построена КМПРО для описания соответствующих лечебных процедур в зависимости от поставленного диагноза.

Для описания динамики, происходящей в анализируемой ПрО, введено также понятие состояния $S(i\Delta t)$ в привязке к текущему моменту времени $i\Delta t$ в виде тройки

$$S_{\Pi}(i\Delta t) = \langle X_{\Pi}(i\Delta t), C_{\Pi}(i\Delta t), O_{\Pi}(i\Delta t) \rangle, \quad i = 1, 2, \dots \quad (8)$$

Тогда на основе полученного тем или иным способом или методом алгоритма, с учетом установленной ситуации (8) на текущий момент времени $i\Delta t$ переход из предыдущего состояния в последующее должно выполняться в соответствии со сформулированными в [24] постулатами. Следует принять во внимание тот факт, что мно-

жество состояний содержит то подмножество, которое определяет искомое решение, т. е. является целью применения того или иного алгоритма. Например, требуется определить, выделить, запомнить в виде отдельного файла и представить на выход те значения и параметры ЭКС, которые соответствуют по установленным свойствам искомому фрагменту. Первоначально, т. е. до действия на ЭКС согласно установленному алгоритму, данные файла по искомым фрагментам принимаются равными нулю или иному начальному значению. В результате действия в течение установленного такта времени Δt осуществляется цепочка преобразований в соответствии с выбранной составляющей вектора $\mathbf{\Theta}_{jn}(n\Delta t)$. Эти действия переводят начальный вектор состояний в некоторое его новое значение $S_{\Pi j}[(n+1)\Delta t]$ в соответствии с обобщенным равенством [25]

$$S_{\Pi j}[(n+1)\Delta t] = \mathbf{\Theta}_{jn}(n\Delta t) S_{\Pi}(n\Delta t). \quad (9)$$

Однако ввиду объективных причин: вероятностных свойств ЭКС и воздействующих на него помех, а также свойств решаемой задачи в заданной ПрО, как правило, после первого такта преобразований в соответствии с (9) полученный вектор состояний не соответствует искомому решению. Вследствие этого к приобретенному новому состоянию в следующий такт времени повторно применяется установленная согласно алгоритму последовательность действий. Для того чтобы принять решение о том, что обретенное значение вектора в результате последовательно изменяющейся цепочки состояний в соответствии с алгоритмом является искомым значением, необходимо выработать и ввести определенное правило или критерий. Обычно подобный критерий в рассматриваемой ПрО разрабатывается на основе сравнения текущего значения состояния, определяющего, например, искомый фрагмент или его параметр с некоторым пороговым значением, в том числе когда это пороговое значение определяет в (9) заданное число тактов итерации. Причем пороговое значение первоначально априорно назначается, но в процессе действия алгоритма может корректироваться в зависимости от изменения свойств ЭКС.

В соответствии с проведенным анализом становится ясно, что формально ЛСА представляет собой последовательность операторов, определяемых составляющими векторов \mathbf{OP} и $\mathbf{\Theta}$. Заметим, что задача сравнения между собой алгоритмов автоматического определения фрагментов ЭКС на основе использования ЛСА облегчается и стано-

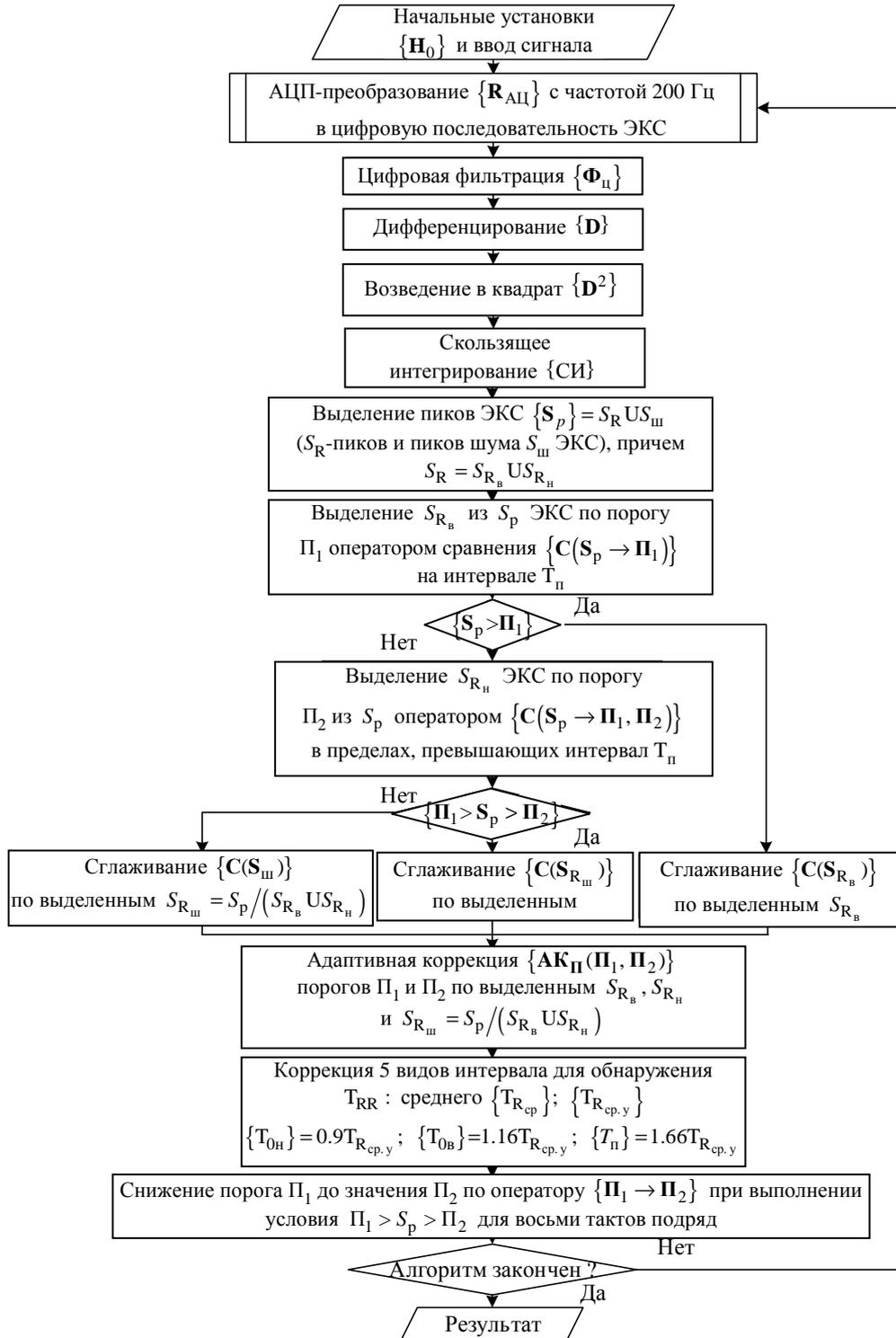
вится наглядной благодаря тому, что ЛСА, прежде всего, отражает морфологию алгоритмов на основе формирования символического языка в виде операторов и наличия определенных правил (синтаксиса) их композиции, определяемых техническими и теоретико-логическими ограничениями. Наглядность ЛСА возрастает, если свести к минимуму простое обозначение операторов в виде одной проиндексированной буквы (как это рекомендуется авторами ЛСА), а по возможности использовать дескрипцию, отражающую смысловую составляющую – семантику оператора. В целом, использование операторов в виде символов дает возможность применять при сравнении алгоритмов известные алгебраические операции, например такие, как пересечение, объединение, дополнение и инверсию. Отметим следующие важные стороны результатов структурирования алгоритмов с целью определения множества операторов в заданной ПрО. Известно [26], что в настоящее время все большее применение находят программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), матричные аналоговые большие интегральные схемы (МАБИС) и перепрограммируемые аналоговые интегральные схемы (ПАИС), разработка и применение которых в реальных электронных устройствах может быть непосредственно привязано к операторам ЛСА, разработанным в смежных ПрО, например таких, как автоматическая фрагментация и автоматизация диагностики нозологических состояний пациента по электрофизиологическим показателям. Представляется также, что описание методов и алгоритмов на базе ЛСА может, в принципе, существенно облегчить процесс программирования на основе декларативных или объектно-ориентированных языков программирования благодаря выделению области их применения в рамках задачи автоматического анализа ЭКС с учетом его специфичности и при воздействии комплекса помех. Использование ЛСА помимо морфологического и, значит, качественного сравнения различных проблемно-ориентированных алгоритмов позволит при дальнейших доработках ПрО применить иерархическую структуризацию в виде (4)–(7) и получить количественные оценки преимуществ того или иного алгоритма с учетом свойств и отношений соответствующих уровней иерархии КМПрО. Действительно, как уже упоминалось, любой оператор может быть представлен последовательностью элементарных действий (актов), реализуемых соответствующими электронными или программ-

ными компонентами на основе КМПрО (6). Для каждого элементарного акта можно определить его технические признаки, свойства и параметры, в том числе и динамические, а через них и аналогичные интегральные свойства выделенного оператора в целом. Простейший пример: скорость переключения каждого триггера позволяет без труда вычислить быстродействие двоичного счетчика или регистра. В результате этого каждый оператор принципиально можно описать вектором параметров, на основании которого в выбранном пространстве параметров сформировать или выбрать на основе априорных знаний критерий, позволяющий осуществить количественную оценку и через нее выполнить соответствующее сравнение технических свойств рассматриваемых алгоритмов. По существу упрощенная форма ЛСА была применена в [10], на основании которой автор использовал те свойства ЛСА, которые были необходимы для предложенной в данной работе теории метрологического анализа и синтеза измерительных алгоритмов (процедур). Однако для анализа и сравнения между собой многообразия разработанных к настоящему времени алгоритмов фрагментации ЭКС упрощенная форма ЛСА не может быть применена и требует специальной разработки полного перечня операторов с вложенной в него семантикой, ориентированной на конкретную ПрО для ее дескриптивного представления.

Для иллюстрации методики формирования искомого перечня операторов обратимся в качестве примера к известному достаточно сложному алгоритму Пана–Томпкинса [1], [2], предназначенному для автоматической фрагментации ЭКС. Данный алгоритм представляет интерес прежде всего тем, что он наиболее часто упоминается в литературных источниках и его составляющие положены в основу разработки различных модификаций подобных алгоритмов [2], [13]. Алгоритм Пана–Томпкинса был разработан в 80-х, доработан в 90-х гг. прошлого века и интересен тем, что сочетает в себе все признаки, характерные для алгоритмов, направленных на автоматизацию обработки биомедицинской информации, начиная от элементов выделения сигналов из шума, обнаружения событий, положенных в основу фрагментации, и заканчивая использованием локальной адаптацией отдельных параметров. Причем в постановке, в рамках которой была осуществлена адаптация в предложенном алгоритме, уже тогда просматривались элементы искусственного интеллекта.

Для построения ЛСА алгоритма Пана–Томпкинса целесообразно предварительно разработать два промежуточных способа описания, а именно – описание в соответствии с широко распространенной схемой алгоритмов с последующим словесным описанием семантики денотата тех операторов, которые выделены в схеме алгоритмов [22]. В представленной на рисунке схеме

алгоритма Пана–Томпкинса согласно произвольному описанию последовательности преобразований ЭКС в [1] и [2] (не систематизированного в соответствии с принятыми правилами описания алгоритмов, включая словесное описание) отражена последовательность процессов (действий в соответствии с введенными операторами), производимых алгоритмом, которые приводят к конечному



результату, т. е. к автоматическому выделению фрагмента ЭКС, соответствующего QRS-комплексу. Дальнейшая словесная форма описания алгоритма в сочетании со схемой алгоритмов как раз и определяет методику формирования описания алгоритмов в виде ЛСА на основе использования общепринятых операторов, содержание которых раскрыто в словесном описании алгоритма.

В соответствии с рисунком выделены следующие процессы и условные переходы с обозначением операторов:

1. Ввод сигнала ЭКС с аддитивной помехой $Y(t)$ и начальная установка посредством оператора $\{H_0\}$ параметров алгоритма: уровней первого Π_1 и второго порогов Π_2 ограничения снизу ЭКС; интервалов: $T_{R_{cp}}$ – среднее значение RR-интервалов; $T_{R_{cp,y}}$ – среднее значение усеченных RR-интервалов в диапазоне $[T_{0н}, T_{0в}]$, где $T_{0н} = 0.92T_{R_{cp,y}}$, $T_{0в} = 1.16T_{R_{cp,y}}$; $T_{п}$ – предельный интервал, равный $1.66T_{R_{cp,y}}$, для обнаружения RR-интервала по порогу Π_1 .

2. Аналого-цифровое преобразование, выполнение которого определяется оператором $\{R_{АЦ}\}$.

3. Цифровая фильтрация (оператор $\{Ф_{ц}\}$) в виде последовательно выполняемых по конечной разности цифровой фильтрации нижних и верхних частот.

4. Аппроксимация дифференцирования по конечной разности в соответствии с оператором $\{D\}$.

5. Возведение в квадрат результатов дифференцирования оператором $\{D^2\}$.

6. Скользящее интегрирование в заданных пределах оператором $\{СИ\}$ результата возведения в квадрат.

7. Выделение и фиксация (запоминание) пиковых значений ЭКС S_p в момент изменения знака его производной, т. е. в соответствии с оператором $\{S_p\}$.

8. Сравнение с первым порогом Π_1 пиковых S_p значений ЭКС для выделения S_{R_b} , т. е. R-зубца высокого уровня оператором $\{C(S_p \rightarrow \Pi_1)\}$ на интервале $T_{п}$.

9. Оператор $\{S_p > \Pi_1\} \uparrow^1$ условного перехода по стрелке 1.

10. Сравнение S_p с первым Π_1 и вторым Π_2 порогом для выделения S_{R_n} – R-зубца низкого уровня, находящегося в интервале (Π_1, Π_2) оператором $\{C(S_p \rightarrow \Pi_1)\}$ на интервале $T > T_{п}$, и пика

помехи (шума, артефакта) $S_{ш}$ при обнаружении события, когда $S_p < \Pi_2$.

11. Оператор $\{\Pi_1 > S_p > \Pi_2\} \uparrow^2$ условного перехода по стрелке 2.

12. Экспоненциальное сглаживание S_{R_b} оператором $\{C(S_{R_b})\}$ с параметром 0.875.

13. Экспоненциальное сглаживание S_{R_n} оператором $\{C(S_{R_n})\}$ с параметром 0.75.

14. Экспоненциальное сглаживание $S_{ш}$ оператором $\{C(S_{ш})\}$ с параметром 0.875.

15. Адаптивная коррекция оператором $\{AK(\Pi_1, \Pi_2)\}$ уровней порогов Π_1 и Π_2 по сглаженным пикам R-зубцов S_{R_b} и S_{R_n} и помехи (шума) $S_{ш}$.

16. Определение за восемь RR-интервалов операторами $\{T_{R_{cp}}\}$; $\{T_{R_{cp,y}}\}$ скользящего усреднения усредненных интервалов $T_{R_{cp}}$, превышающих диапазон $[T_{0н}, T_{0в}]$ и $T_{R_{cp,y}}$, лежащих в диапазоне $[T_{0н}, T_{0в}]$ соответственно, причем операторами: $\{T_{0н}\}$; $\{T_{0в}\}$; $\{T_{п}\}$, перемножением на константы 0.92; 1.16; 1.66 интервала $T_{R_{cp,y}}$, устанавливаются интервалы: $T_{0н}$; $T_{0в}$; $T_{п}$ соответственно.

17. Снижение уровня порога Π_1 до значения порога Π_2 с сохранением для него требований п. 16 в соответствии с оператором $\{\Pi_1 \rightarrow \Pi_2\}$ по критерию выполнения в течение восьми последних тактов сравнения, идущих подряд, постоянства событий: $\Pi_1 > S_p > \Pi_2$.

18. Проверка условия для окончания алгоритма $\{KA\} \uparrow^3$ и условный переход по результатам проверки по стрелке 3.

19. Фиксация окончания алгоритма оператором $\{K\}$ для принятия последующих решений.

Ориентируясь на рисунок и используя представленное словесное описание алгоритма, получим следующую компактную запись алгоритма Пана–Томпкинса в виде ЛСА:

$$\begin{aligned} & \{H_0\}Y(t) \downarrow^3 \{R_{АЦ}\} \{Ф_{ц}\} \{D\} \{D^2\} \{СИ\} \{S_p\} \\ & \{C(S_p \rightarrow \Pi_1)\} \{S_p > \Pi_1\} \uparrow^1 _ , \\ & \{C(S_p \rightarrow \Pi_1, \Pi_2)\} \{\Pi_1 > S_p > \Pi_2\} \uparrow^2 \downarrow^1 \\ & \{C(S_{R_b})\} \{C(S_{R_n})\} \downarrow^2 \{C(S_{ш})\} \\ & \{AK(\Pi_1, \Pi_2)\} _ , \quad (2) \\ & \{T_{R_{cp}}\} \{T_{R_{cp,y}}\} \{T_{0н}\} \{T_{0в}\} \\ & \{T_{п}\} \{\Pi_1 \rightarrow \Pi_2\} \{KA\} \uparrow^3 \{K\}. \end{aligned}$$

При анализе (2) возникают следующие основные вопросы:

1. Насколько унифицированы по виду операторы представленной ЛСА для того, чтобы их применять при описании других известных алгоритмов автоматической фрагментации ЭКС посредством ЛСА?

2. Если сформированные операторы отвечают требованиям унификации, то отвечают ли эти операторы требованию унификации по параметрам?

3. Если по параметрам имеются отличия, то насколько они значимы для того, чтобы ответить на вопрос: существенны ли эти отличия для унификации анализируемого оператора или нет?

Для того чтобы обоснованно ответить на эти вопросы, необходимо прежде всего, во-первых, по возможности выполнить соответствующие описания ЛСА существующего множества алгоритмов и способов фрагментации ЭКС, представленных в доступных патентах и других источниках и, во-вторых, составить по этим описаниям перечень или общую спецификацию операторов. Для поиска от-

ветов на последние два вопроса в случае обнаружения той или иной значимой модификации найденных исходных операторов необходимо перейти, пользуясь представленной методикой, к детальному анализу соответствующих операторов на основе КМПРО, используя иерархическую КМПРО.

Таким образом, проведенный анализ показывает целесообразность применения разработанных за последние десятилетия технологий искусственного интеллекта для структуризации, систематизации и спецификации накопленных знаний в предметной области, относящейся, в частности, к автоматической фрагментации ЭКС с последующим переходом к комплексному решению проблем анализа и синтеза в области автоматической диагностики по электрофизиологическим показателям. Применение рассматриваемого подхода позволит существенно повысить эффективность проектирования и качество диагностических биотехнических систем на современной электронной базе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tompkins W. J. Biomedical Digital Signal Processing. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1995.

2. Рангайян Р. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / пер. с англ.; под ред. А. П. Немирко. М.: Физмазлит, 2007. 440 с.

3. Тихонов Э. П., Федотенкова М. Л. Адаптивные алгоритмы для измерения признаков биомедицинских показателей при автоматической медицинской диагностике по электрофизиологическим показателям // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. № 4. С. 4–12.

4. Тихонов Э. П. Адаптивные алгоритмы фильтрации и фрагментации электрокардиограмм высокого временного разрешения. Ч. 1: Исходные сведения и анализ подхода к решению проблемы // Информационно-управляющие системы. 2010. № 3(70). С. 125–131.

5. Тихонов Э. П. Адаптивные алгоритмы фильтрации и фрагментации ЭКГ высокого временного разрешения. Ч. 2: Синтез адаптивного алгоритма и результаты эксперимента // Информационно-управляющие системы. 2010. № 4(71). С. 117–124.

6. Смирнов К. Ю., Смирнов Ю. А. Вариационный анализ ритмов сердца. Разработка и исследование методов математического моделирования и анализа биоэлектрических сигналов. URL: <http://mediaspo.com/wp-content/uploads/2013/08/VARS-Research.pdf>. Дата доступа: 01.05.15.

7. Петров П. Г. Разработка методов обработки временных и пространственных характеристик процессов в медицинских диагностических системах: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Таганрогский гос. радиотехнический ун-т. Таганрог, 2006. 16 с.

8. Плотников А. В. Автоматизированный анализ электрокардиографических сигналов в системах при-

кроватного мониторинга. URL: <http://www.uran.donetsk.ua/~masters/2010/fkita/pichka/library/article12.htm>. Дата доступа: 06.06.15.

9. Селиванов М. Н., Кудряшова Ж. Ф., Фридман А. Э. Качество измерений: метрологическая справ. книга. Л.: Лениздат, 1987. 295 с.: ил.

10. Цветков Э. И. Метрология. Модели. Метрологический анализ. Метрологический синтез. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. 293 с.

11. Козюра А. В. Методы и средства контроля электрокардиоаппаратуры и качества электрокардиографических сигналов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / ФГБОУ ВПО «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс». Орел, 2013.

12. Измерения при анализе ЭКГ 2010. URL: <http://window.edu.ru/resource/650/44650/files/2001-0079-0-02.pdf>. Дата доступа: 10.06.15.

13. Рослякова А. В., Чупраков П. Г. Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения R-зубца электрокардиосигнала // Вятский мед. вестн. 2012. № 2. С. 29–33.

14. Филист С. А., Шаталова О. В., Тун З. О. Алгоритмы анализа персональных регистраторов ЭКГ // Научные ведомости Белгородского гос. ун-та. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. 2011. Т. 18/1, № 7 (102). С. 132–139.

15. Фадин В. С. Алгоритмы выделения QRS-комплекса в ЭКГ // iLab. 2010. URL: <http://ilab.xmed-test.net/?q=node/126>. Дата доступа: 07.06.15.

16. Богатов Н. М., Гук В. Ф. Сравнительный анализ методов распознавания электрокардиограмм // Современные наукоемкие технологии. 2006. № 1. С. 71–72.

17. Истомин Б. А. Систематизация методов анализа ЭКГ с учетом их помехоустойчивости // Изв. Южного федерального ун-та. Сер. Техн. науки. 2010. Вып. 8 (109). С. 86–90.
18. Коробейников А. В. Разбиение сигнала электрокардиограммы на циклы // Сб. науч. тр. ИжГТУ. / науч. ред.: В. Е. Лялин. Сер. Математическое моделирование и интеллектуальные системы. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2003. № 1. С. 60–64.
19. Алгоритмы анализа персональных регистраторов. URL: <http://www.medicolution.ru/fjbs-1012-1.html>. Дата доступа: 14.06.15.
20. Болотова Л. С. Системы искусственного интеллекта: модели и технологии, основанные на знаниях: учеб. / ФГБОУ ВПО РГУИТП; ФГАУ ГНИИ ИТТ «Информатика». М.: Финансы и статистика, 2012. 664 с.: ил.
21. Ляпунов А. А. О логических схемах программ // Проблемы кибернетики. М.: Физматгиз, 1958. Вып. 1. 259 с.
22. Шалыто А. А. Автоматное проектирование программ. Алгоритмизация и программирование задач логического управления // Изв. академии наук. Теория и системы управления. 2000. № 6. С. 63–81.
23. Колтун В. М., Трусов Ю. С. Селектор зубцов R, выделяющий сигнал по геометрическим признакам // Мед. техника. 1985. № 3. С. 32–39.
24. Тихонов Э. П. Системный анализ, алгоритмы и адаптация в аналого-цифровых микропроцессорных системах для медико-технических приложений. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 204 с.
25. Могилевский В. Д. Формализация динамических систем. М.: Вузовская кн., 1999. 216 с.: ил.
26. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника: учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 816 с.: ил.

E. P. Tikhonov

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

A CONCEPTUAL DOMAIN MODEL AUTOMATIC FRAGMENTATION ELECTROCARDIOGRAM BASED ON LOGICAL SCHEMES OF ALGORITHMS

In the article developed and presented a conceptual model of the domain of synthesis of algorithms of automatic fragmentation of basic electrophysiological indicators by analyzing the electrocardiogram on the basis of information obtained in this field during the in previous decades. The developed approach is focused on improving the efficiency of using the accumulated information resource (knowledge) in the field of automatic diagnostics for further improvement and development of methods and means of automation of medical diagnosis.

Electrocardiogram, subject area, algorithm, automatic fragmentation, logic algorithms, operator