

УДК 004.93, 004.85

А. С. Менлитдинов, аспирант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
А. В. Коробейников, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова
Д. Ю. Ивашкин, магистрант, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ОБЗОР СОСТОЯНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО АЛГОРИТМАМ АНАЛИЗА АРИТМИЙ

Введение

Электрокардиография (ЭКГ) широко распространена в современной медицине и еще долгое время будет оставаться одним из основных способов анализа состояния здоровья человека. В настоящее время продолжается развитие методов обработки сигналов ЭКГ (ЭКС). Этому способствуют следующие факторы: 1) повышение производительности вычислительных систем; 2) развитие старых и создание новых методик и алгоритмов обработки ЭКС. Основной причиной развития методик анализа ЭКГ является то, что ни одна из существующих систем анализа ЭКГ на данный момент не дает достоверность результата диагностики на 100 %.

Основными общепринятыми методиками анализа ЭКГ являются: 1) разбиение на кардиоциклы и подсчет частоты сердечных сокращений (ЧСС); 2) анализ морфологии кардиоциклов; 3) распознавание нарушений ритма (аритмий); 4) оценка вариабельности ритма. В данной работе рассматривается проблема современного состояния одной из методик анализа ЭКГ, а именно анализа аритмий. Суточная запись ЭКС содержит около 100 тысяч кардиоциклов. В этом объеме кардиоциклов необходимо детектировать и классифицировать единичные нарушения ритма при наличии помех и артефактов.

Теме повышения качества анализа ЭКС посвящено большое число отечественных и зарубежных работ. Основными источниками информации по исследованиям при данном обзоре послужили ресурсы:

arXiv.org — крупнейший бесплатный архив электронных публикаций научных статей и препринтов по физике, математике, астрономии, информатике и биологии;

ResearchGate.net — бесплатная социальная сеть ученых всех научных дисциплин;

eLIBRARY.ru — Российская научная электронная библиотека, интегрированная с российским индексом научного цитирования (РИНЦ).

Всего было рассмотрено около 250 современных работ по анализу аритмий. Большое количество современных публикаций говорит об актуальности темы.

Наиболее полный современный обзор состояния исследований в части методов и алгоритмов анализа ЭКГ приведен в работе [1].

База ЭКС для оценки качества работы алгоритмов

Для сравнения современных алгоритмов анализа аритмий используется база [2] (*MIT-BIH Arrhythmia Database Directory*), содержащая ЭКС различных патологий. Каждый элемент ЭКС в базе отмечен экспертами, что позволяет тестировать алгоритмы анализа и определять качество работы алгоритмов.

Распознавание на основе шаблонов

Публикации по методам обработки биомедицинских сигналов и распознавания образов предлагают широкий спектр решений и подходов для обнаружения *QRS*-комплексов ЭКГ. Даже в публикациях еще 60-х годов XX века такие алгоритмы, как *AZTEC* и *Pan-Tompkins*, показывали высокую степень обнаружения *QRS*-комплексов [3].

Основной принцип алгоритма *AZTEC* — измерение склонов ЭКС (амплитудный анализ). Обнаружение аритмий производилось на основе длительностей *RR*-интервалов. Точность обнаружения *QRS*-комплексов составляла 99 % на обучающей выборке из 36 пациентов. Алгоритм имеет проблемы при высоком уровне помех [4].

Алгоритм *Pan-Tompkins* использует ряд математических преобразований, чтобы определить длительность, амплитуду и наклон отдельных фрагментов ЭКС. Алгоритм состоит из этапов: 1) линейная цифровая фильтрация; 2) возведение в квадрат сигнала; 3) обнаружение *QRS*-комплекса на основе порогов и логических условий. Алгоритму необходим этап обучения. Точность обнаружения по базе *MIT-BIH* составила 99,3 %. В целом алгоритм основан на методах цифровой фильтрации [5, 6].

Разбиение ЭКС на циклы на основе цифровой фильтрации рассмотрено в работе [7].

Кодирование ритма и распознавание аритмий на основе шаблонов предложено в работе [8]. Кодирование ритма производят на основе: 1) типа *QRS*-комплекса (норма / не норма); 2) типа длительности *RR*-интервала (короткий / нормальный / длинный). Шаблоны, описывающие различные типы аритмий, заранее определены.

В работе [9] метод обнаружения и классификации аритмий на основе базы знаний аритмий использует только сигнал *RR*-интервалов (участки по 3 *RR*-интервала). Для обнаружения аритмий используют де-

терминированный автомат. При тестировании на базе *MIT-BIH* точность классификации 98 %, точность обнаружения 94 %.

Подобный упрощенный подход применен и во множестве других работ.

Методы преобразования ЭКС

Различные преобразования – ряды Фурье, дискретное вейвлет-преобразование (*DWT*), преобразование Гильберта, эмпирический метод разложения (*Empirical Mode Decomposition, EMD*) и аналогичные – выполняются для перехода из временной области. При переходе в частотную область характеристики отдельных фрагментов ЭКС затем используются для выделения отдельных элементов ЭКС, как правило, *QRS*-комплексов, на основе определенных логических условий. Степень обнаружения для наиболее современных алгоритмов составляет более чем 99,5 % [10].

В работе [11] метод основан на частотно-временном анализе взвешенным перекрывающим добавлением (*WOLA*) передискретизированного фильтр-банка. Сигналы формируют из внутрисердечных электрограмм, разлагают в частотно-временной области и анализируют параллельными пиковыми детекторами в частотных поддиапазонах. Анализируют согласованность поддиапазонных пиков.

В работе [12] используется мера мощности спектра ЭКС для разделения участков нормального ритма и аритмий. По фрагментам из 10 кардиоциклов строится карта нарушений. Использование спектральной энтропии позволило классифицировать фибрилляции предсердий в ЭКС пациентов для 90,3 % тестовых образцов.

В работе [13] спектральный анализ *P*-зубца расширяет диагностируемые аритмии.

В работе [14] связывают спектр ЭКС с пространственно-временной динамикой источников сердечных сигналов и измеряют характеристики систем отведений.

Неоптимальные параметры *DWT* могут ухудшить результаты. В работе [15] предложен алгоритм оптимального выбора значений параметров *DWT*.

В работе [16] применен анализ *EMD* для разложения серии кардиоциклов на компоненты с целью выявления дыхательной составляющей ЭКС. Показана синхронизация порядка 1:1, что подтверждает существование фазы и частоты связи между дыхательной составляющей ЭКС и самим дыхательным сигналом.

В работе [17] оценивается кодирование ЭКС нелинейными характеристиками (информационная энтропия и сложность по Лемпелю – Зиву) для распознавания аритмий.

В работе [18] рассматривается гибридная классификация аритмий в условиях шума и артефактов. *DWT* каждого *QRS*-комплекса представляется виртуальными образами из 8 секторов. Для 7 типов аритмий достигнута точность 98,06 %.

В работах [19, 20] вычисляются статистические параметры *DWT* сегментов ЭКС на участках: 1) до сегмента; 2) сам сегмент; 3) после сегмента.

Методы преобразования ЭКС использованы в большом числе других работ.

Методы классификации

На современном этапе исследований существуют быстрые и надежные подходы, основанные на различных классификаторах (искусственные нейронные сети, ИНС, метод опорных векторов, *SVM* и т. д.). В этих подходах выполняют предобработку ЭКС для удаления шумов и выделения отличительных характеристик, которые в дальнейшем используют в качестве параметров для алгоритмов классификации [21].

В работе [22] используется вероятностная ИНС (*PNN*) и генетический алгоритм (ГА). *DWT* используется для извлечения морфологических параметров, а медианный фильтр – для сокращения объема данных. С помощью ГА оптимизируют подмножество морфологических параметров. Для 8 типов аритмий точность составила 99,42 %.

В работе [23] используются ИНС многослойный перцептрон (*BP MLP*), ИНС с радиально-базисной функцией (*RBF NN*) и метод опорных векторов (*SVM*).

В работе [24] используются *SVM* в различных пространствах представлений, спектры значений Фурье сегментов ЭКС (0,5...4 с) и их более низкие пространственные проекции. Получена точность обнаружения аритмий 93 %.

Во многих других работах используются опорные векторы и различные ИНС.

В ряде работ используются методы нечеткого логического вывода [25, 26].

Лингвистический анализ

В классической работе [27] для составления алфавита, кодирующего сигнал, предлагается использовать различные функции сложности (информативности). Отделяя простые участки от сложных производят сегментацию сигнала. При анализе ЭКС алгоритмы строят по схемам: 1) выделяя *QRS*-комплексы, получают непосредственно алфавит для записи ЭКС; 2) методы преобразования ЭКС, которые можно рассматривать как функции сложности: возможен подробный анализ ЭКС.

В работе [28] рассмотрены алгоритмы анализа аритмий от разбиения ЭКС на циклы до формирования последовательности типов аритмий. Построение словаря аритмий выполняется на основе секвенциального анализа. Классификация типа аритмии производится на основе лингвистического анализа.

Методы преобразования являются аналогами функции сложности ЭКС.

Авторегрессивное моделирование

В работе [29] предложена методика на основе авторегрессивного моделирования для классификации нормального ритма и различных аритмий. Коэффициенты авторегрессии вычислены по алгоритму Бурга и классифицированы по обобщенной линейной

модели (*GLM*). Показана точность определения аритмий выше 93,2 %.

Скрытые марковские модели

Поскольку ЭКС является временным рядом, статистический и интеллектуальный анализ данных непосредственно не применим из-за нарушения независимости между элементами ЭКС. Из-за существования переходных вероятностей между элементами ЭКС для его анализа применимы скрытые марковские модели (*CMM*, *Hidden Markov Models*, *HMM*). Заметные результаты были достигнуты в обнаружении *QRS*-комплексов и в классификации аритмий [30].

В работе [31] рассмотрен метод стохастического анализа ЭКС. Используются спектр мощности ЭКС. Для анализа свойств *CMM* используется уравнение Фоккера – Планка.

В работе [32] предлагается для *RR*-серий использовать скрытую полумарковскую модель, отличающуюся от классической *CMM* тем, что будущее скрытое состояние зависит как от текущего состояния, так и от времени состояния.

В работе [33] указывается, что *CMM* неадекватно моделируют переходы между элементами ЭКС. Для устранения недостатка предлагаются методы: 1) схема разделения состояний *CMM*; 2) байесовские сети с зависимыми переходами.

CMM используются также в ряде других работ.

Аналитическое машинное обучение

В работе [34] предлагается метод индуктивного логического программирования (*ILP*) – аналитическое машинное обучение, что улучшает результаты анализа.

Несколько источников данных

В устройствах мониторинга в отделениях реанимации используются только ЭКС для диагностирования сердечных аритмий. Однако существуют другие источники данных: артериальное давление, фонокардиограмма, дыхание и т. д.

В работе [35] ЭКС рассматривается совместно с артериальным давлением.

В работе [36] рассматривается анализ сигналов кардиотокограмм. Разработан метод измерения частоты сердечных сокращений плода по спектральному алгоритму.

В работе [37] рассматривается связь дыхания и аритмий.

В работе [38] рассматривается алгоритм анализа аритмий, встроенный в кардиомонитор дефибриллятора. Разделено 100 % образцов нормального и шокового ритма.

Электрокардиография высокого разрешения

К новым методам анализа аритмий относится ЭКГ высокого разрешения (ЭКГ ВР). Она позволяет обнаружить низкоамплитудные составляющие ЭКС – поздние потенциалы (ПП), невидимые на стандартной ЭКГ. В работе [39] предложен комплексный метод обработки ЭКГ ВР для классификации ЭКГ на наличие ПП.

Фазовое пространство

В работе [40] предложен метод на основе реконструкции фазового пространства (*PSR*). *PSR* отображает временные ряды к фазовой траектории в многомерном пространстве. Метод *PSR* используется для наблюдения нелинейного поведения динамических систем и обнаружения редких случаев десинхронизации.

Соответствие нарушений ритма областям сердца

На основе морфологических особенностей ЭКГ и учитывая лежащую в основе ЭКГ электромеханику в *3D*-пространстве, кардиолог может выявить проблему в работе сердца и область сердца, связанную с проблемой. ЭКГ используются как недорогой и быстрый инструмент первичной диагностики. Анализ нескольких источников ритма имеет важнейшее значение для обнаружения многих патологий [41].

Методы распознавания речи для обработки биомедицинских сигналов

В статье [42] рассмотрены методы обработки длинных биологических сигналов, в том числе анализ аритмий: метод динамической трансформации времени и *CMM*.

В работе [43] описан алгоритм классификации интервалов речи, работающий совместно с алгоритмом выделения основного тона речи по методу *GS*. Метод *GS* возможно применить для выделения *QRS*-комплексов и распознавания аритмий.

Индивидуальная настройка

Одной из проблем систем анализа ЭКГ является наличие индивидуальных особенностей. Целесообразно проводить обучение алгоритмов на нормальном ЭКС для конкретного пациента, а затем выявлять отклонения от нормы [44].

Анализ аритмий с позиций асимметрии

В работе [45] показано, что в распределении временных интервалов проявляется систематическое изменение в их асимметрии во время динамических переходов между различными типами аритмии.

В работе [46] применен «симметричный» подход к оценке нормального ритма сердца и некоторых вариантов аритмии.

Заключение

Анализ рассмотренных работ позволяет сделать вывод, что на современном этапе развития медицинской техники для анализа аритмий недостаточно использования простых детекторов типов аритмий на основе шаблонов. Большая часть работ посвящена построению моделирования процесса сердечной активности на основе ЭКС – обучению системы. Затем на основе результатов такого обучения производится собственно обнаружение и классификация аритмий.

Библиографические ссылки

1. Velic M., Padavic I., Car S. Computer Aided ECG Analysis – State of the Art and Upcoming Challenges // IEEE EUROCON 2013 International conference on computer as

- a tool, 1–4 July 2013. – Zagreb, Croatia. – URL: arxiv.org/abs/1306.5096.
2. *Mark R., Moody G.* MIT-BIH Arrhythmia Database Directory // Cambridge : Massachusetts Institute of Technology, 1988.
 3. *Velic M., Padavic I., Car S.* Computer Aided ECG Analysis – State of the Art and Upcoming Challenges // IEEE EUROCON 2013 International conference on computer as a tool, 1–4 July 2013. – Zagreb, Croatia. – URL: arxiv.org/abs/1306.5096.
 4. *Velic M., Padavic I., Car S.* Computer Aided ECG Analysis – State of the Art and Upcoming Challenges // IEEE EUROCON 2013 International conference on computer as a tool, 1–4 July 2013. – Zagreb, Croatia. – URL: arxiv.org/abs/1306.5096.
 5. *Velic M., Padavic I., Car S.* Computer Aided ECG Analysis – State of the Art and Upcoming Challenges // IEEE EUROCON 2013 : International conference on computer as a tool, 1–4 July 2013. – Zagreb, Croatia. – URL: arxiv.org/abs/1306.5096.
 6. Real-time ECG monitoring and arrhythmia detection using Android-based mobile devices / S. Gradl, P. Kugler, C. Lohmuller, B. Eskofier // San Diego, CA, Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2012 : Annual International Conference of the IEEE. P. 2452–2455.
 7. *Коробейников А. В.* Разбиение сигнала электрокардиограммы на циклы // Математическое моделирование и интеллектуальные системы. – 2003. – № 1. – С. 60–64.
 8. *Барановский А. Л., Немцко А. П.* Кардиомониторы. Аппаратура непрерывного контроля ЭКГ. – М. : Радио и связь, 1993. – 247 с.
 9. *Tsipouras M. G., Fotiadis D. I., Sideris D.* An Arrhythmia Classification System Based on the RR-Interval Signal // Artificial Intelligence in Medicine, 2005. – Vol. 33, Is. 3. – P. 237–250.
 10. *Velic M., Padavic I., Car S.* Computer Aided ECG Analysis – State of the Art and Upcoming Challenges // IEEE EUROCON 2013 : International conference on computer as a tool, 1–4 July 2013. – Zagreb, Croatia. – URL: arxiv.org/abs/1306.5096.
 11. *Sheikhzadeh H., Brennan R., So S.* Real-Time Cardiac Arrhythmia Detection Using WOLA Filter. – 2007. – No. 1.
 12. *Staniczenko P. A., Lee Ch. F., Jones N. S.* Rapidly detecting disorder in rhythmic biological signals: A spectral entropy measure to identify cardiac arrhythmias // Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics. – 2009, 79, 0119115.
 13. *Хомяков А. В., Щербakov Г. И.* Разработка спектрального метода анализа Р-зубца электрокардиограммы для построения портативного анализатора аритмий сердца // Инфокоммуникационные технологии. – 2011. – Т. 9, № 4. – С. 62–67.
 14. *Requena-Carrion J., Beltran-Molina F. A., Marques A. G.* Relating the spectrum of cardiac signals to the spatiotemporal dynamics of cardiac sources // Biomedical Signal Processing and Control. – 2013. – Vol. 8, Is. 6. – P. 935–944.
 15. Supervised ECG Delineation Using the Wavelet Transform and Hidden Markov Models / G. de Lannoy, B. Frenay, M. Verleysen, J. Delbeke // 4th European Conference of the International Federation for Medical and Biological Engineering. – Springer Berlin Heidelberg, 2009. – P. 22–25.
 16. Deriving the respiratory sinus arrhythmia from the heartbeat time series using Empirical Mode Decomposition / R. Balocchi, D. Menicucci, E. Santarcangelo, L. Sebastiani, A. Gemignani, B. Ghelarducci, M. Varanini // Chaos, Solitons & Fractals. – 2004. – Vol. 20, Is. 1. – P. 171–177.
 17. *Mora L. A., Amaya Jh. E.* Effect of Encoding Method on the Distribution of Cardiac Arrhythmias. – URL: arxiv.org/pdf/1111.5812v1 (дата обращения: 25.09.2015).
 18. ECG arrhythmia recognition via a neuro-SVM-KNN hybrid classifier with virtual QRS image-based geometrical features / M. R. Homaeinezhad, S. A. Atyabi, E. Tavakkoli, H. N. Toosi, A. Ghaffari, R. Ebrahimpour // Expert Systems with Applications. – 2012. – Vol. 39, Is. 2. – P. 2047–2058.
 19. *Коробейников А. В.* Распознавание образов при анализе формы электрокардиограммы // Математическое моделирование и интеллектуальные системы. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2004. – № 1. – С. 45–53.
 20. *Коробейников А. В.* Алгоритмы и комплексы программ мониторинга компьютерных систем для анализа морфологии и ритма электрокардиограмм : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2004. – 23 с.
 21. *Velic M., Padavic I., Car S.* Computer Aided ECG Analysis – State of the Art and Upcoming Challenges // IEEE EUROCON 2013 : International conference on computer as a tool, 1–4 July 2013. – Zagreb, Croatia. – URL: arxiv.org/abs/1306.5096.
 22. Automatic ECG Beat Arrhythmia Detection // M. Bazarghan, Y. Jaber, R. Amandi, M. Abedi. – URL: arxiv.org/pdf/1209.0167v3 (дата обращения: 25.09.2015).
 23. *Soufan O. M., Arafat S.* Arrhythmia Detection using Mutual Information-Based Integration // WConSC 2011 conference, At San Francisco, CA 94132;
 24. *Alwan Y., Svetkovic Z., Curtis M. J.* Classification of Human Ventricular Arrhythmia in High Dimensional Representation Spaces. – URL: arxiv.org/pdf/1312.5354v2 (дата обращения: 25.09.2015).
 25. ECG Arrhythmia Detection Using Fuzzy Classifiers / S. Z. Mahmoodabadi, A. Ahmadian, M. D. Abolhassani, J. Alirezaie, P. Babyn // Fuzzy Information Processing Society, 2007. NAFIPS '07 : Annual Meeting of the North American. – San Diego, CA, June 2007. – P. 48–53.
 26. *Ozbay Yu., Ceylan R., Karlik B.* A fuzzy clustering neural network architecture for classification of ECG arrhythmias // Computers in Biology and Medicine. – 2006. – № 36. – P. 376–388.
 27. *Мотиль В. В., Мучник И. Б.* Лингвистический анализ экспериментальных кривых. – М. : Мир ; ТИИЭР, 1979. – Т. 67, № 5. – С. 12–38.
 28. *Менлитдинов А. С., Барков М. А., Коробейников А. В.* Алгоритм анализа сердечных аритмий с использованием лингвистического и секвенциального анализа и алгоритма кластеризации Cobweb // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 1. – С. 131–136.
 29. *Ge D., Srinivasan N., Krishnan Sh. M.* Cardiac arrhythmia classification using autoregressive modeling // Bio-Medical Engineering OnLine. – 2002.
 30. *Velic M., Padavic I., Car S.* Computer Aided ECG Analysis – State of the Art and Upcoming Challenges // IEEE EUROCON 2013 : International conference on computer as a tool, 1–4 July 2013. – Zagreb, Croatia. – URL: arxiv.org/abs/1306.5096.
 31. *Gutierrez R. M., Sandoval L. A.* Detecting Stochastic Information of Electrocardiograms. – URL: arxiv.org/pdf/physics/0307040v1 (дата обращения: 25.09.2015).
 32. On-line apnea-bradycardia detection using hidden semi-Markov models / M. Altuve, G. Carrault, A. Beuchee, P. Pladys, A. I. Hernandez // Conference proceedings : Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2011; 2011:4374-7.
 33. *Frenay B., de Lannoy G., Verleysen M.* Improving the transition modelling in hidden Markov models for ECG seg-

mentation // 17th European Symposium on Artificial Neural Networks, Bruges, Belgium, April 22–24, 2009.

34. Fromont E., Quiniou R., Cordier M.-O. Learning rules from multisource data for cardiac monitoring // Aberdeen, UK, 10th Conference on Artificial Intelligence in Medicine, 2005. – P. 484–493.

35. Fromont E., Quiniou R., Cordier M.-O. Learning rules from multisource data for cardiac monitoring // Aberdeen, UK, 10th Conference on Artificial Intelligence in Medicine, 2005. – P. 484–493.

36. Сравнение спектрального и автокорреляционного алгоритмов при доплерометрии сердечного ритма плода в кардиотокографии / А. П. Казанцев, С. Г. Гуржин, Ю. Н. Пономарева, В. С. Ралле // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2013. – № 7. – С. 56–64.

37. Deriving the respiratory sinus arrhythmia from the heartbeat time series using Empirical Mode Decomposition / R. Balocchi, D. Menicucci, E. Santarcangelo, L. Sebastiani, A. Gemignani, B. Ghelarducci, M. Varanini // Chaos, Solitons & Fractals. – 2004. – Vol. 20, Is. 1. – P. 171–177.

38. Krasteva V., Jekova I. Assessment of ECG frequency and morphology parameters for automatic classification of life-threatening cardiac arrhythmias // Physiological Measurement, 26(5):707-23, 2005. (DOI: 10.1088/0967-3334/26/5/011).

39. Иванушкина Н. Г., Иванько Е. О., Матвеева Н. А. Нейронные сети для распознавания образов поздних потенциалов предсердий // Electronics and communications. – 2013. – № 5. – С. 72–80.

40. A novel approach for the diagnosis of ventricular tachycardia based on phase space reconstruction of ECG /

G. Koulaouzidis, S. Das, G. Cappiello, E.B. Mazomenos, K. Maharatna, J. Morgan // International Journal of Cardiology. – 2014. – Vol. 172, Is. 1. – P. 31–33.

41. Myocardial infarction classification with multi-lead ECG using hidden Markov models and gaussian mixture models / P.-C. Chang, J.-J. Lin, J.-C. Hsieh, J. Weng // Applied Soft Computing. – 2012. – Vol. 12, No. 10. – P. 3165–3175.

42. Speech recognition methods applied to biomedical signals processing / D. Novak, M. Aboy, P. Mico, L. Lhotska // Conference proceedings : Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2004; 1:118-21.

43. Архипов И. О., Гитлин В. Б., Лузин Д. А. Синхронный с основным тоном двухпроходной алгоритм принятия решения «тон – не тон» // Вестник ИжГТУ. – 2008. – № 4. – С. 150–153.

44. Temporal and postural variation of 12-lead high-frequency qrs electrocardiographic signals in asymptomatic individuals / P. K. Douglas, N. J. Batdorf, R. T. Evans, A. H. Feiveson, B. Arenare, T. T. Schlegel // Journal of electrocardiology. – 2006. – Vol. 39, № 3. – P. 259–265.

45. Are arrhythmic hearts more complex? Using skewness and the first-digit phenomenon to identify dynamical transitions in cardiac models / P. Seenivasan, S. Easwaran, S. Sridhar, S. Sinha. – URL: arxiv.org/pdf/1508.00865v1 (дата обращения: 25.09.2015).

46. Анализ аритмий сердца с позиций «симметричного подхода» / В. А. Добрых, Т. К. Тен, А. Г. Еремеев, И. Н. Кузьмин, И. В. Уварова // Дальневосточный медицинский журнал. – 2009. – № 3. – С. 110–113.

Получено 28.10.15

УДК 621.317.3

Ю. Г. Подкин, доктор технических наук, профессор, Сарапульский политехнический институт (филиал) ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

Т. Г. Чикуров, кандидат технических наук, доцент, Сарапульский политехнический институт (филиал) ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

Введение

При разработке автономных и резервных гибридных источников питания (ГИП) все шире используется сравнительно новый, перспективный класс ультравысокоемкостных конденсаторов на основе двойного электрического слоя (ДЭС) разнополярных ионов (electric double layer capacitor – EDLC в англоязычной транскрипции) – суперконденсаторы (СК) или ионисторы [1, 2]. Для принятия обоснованного решения о диапазоне применимости этих приборов в разрабатываемой аппаратуре разного назначения необходимо четко представлять предельные возможности этих приборов. Основным элементом конструкции СК служит элементарная двухэлектродная ячейка. В качестве электродов СК используют нанопористые углеродные материалы с удельной поверхностью до 1000...3000 м²/г. Межэлектродное пространство заполняют водным рас-

твором простых устойчивых ионогенных соединений (NaCl, KOH, H₂SO₄, NaF и др) или органическим (водонерастворимым) электролитом. На границах электрод – электролит образуется два последовательно соединенных через электролит ДЭС, а накопленный заряд снимается с электрических слоев в материале электродов. В результате емкость ячейки СК определяется наименьшей из емкостей ДЭС, а допустимое рабочее напряжение равно напряжению разложения электролита [3–6]. Такая конструкция позволяет создавать СК емкостью 1...10 000 Ф.

Возможность использования и надежность СК определяются в первую очередь воспроизводимостью номинального значения емкости $C_{ном}$, эквивалентного последовательного сопротивления (ЭПС) величиной пробивного напряжения $U_{пр}$, предельным значением зарядного тока и количеством циклов заряда-разряда ($10^5...10^6$). Основные электрические