

Лучинин Алексей Витальевич – Южный федеральный университет; e-mail: luchinin46@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 89198745447; к.т.н.; доцент.

Старченко Ирина Борисовна – e-mail: star@fep.tti.sfedu.ru; тел.: 89185068497; кафедра ЭГА и МТ; д.т.н.; профессор.

Резниченко Александр Анатольевич – e-mail: naos_88@mail.ru; тел.: 89518221278; аспирант.

Luchinin Alexey Vital'evich – Southern Federal University; e-mail: luchinin46@yandex.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79198745447; cand. of eng. sc.; associate professor.

Starchenko Irina Borisovna – e-mail: star@fep.tti.sfedu.ru; phone: +79185068497; the department of EHA&MT; dr. of eng. sc.; professor.

Reznichenko Alexander Anatolievich – e-mail: naos_88@mail.ru; phone: +79518221278; post-graduate student.

УДК 616.172.4, 53.082.7

В.Г. Полосин

СПОСОБ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматривается возможность повышения эффективности автоматического анализа электрокардиографической информации, основанная на применении современных статистических методов анализа информации, содержащейся в выборке результатов измерений. В частности, показана взаимосвязь кинетики изменения результатов ЭКГ и формы распределения выборки случайных величин, полученных за один период сокращения сердца. Предложен способ анализа кардиографической информации, основанный на оценке центральных моментов высокого порядка для статистического распределения результатов, полученных в течение одного периода сердечного сокращения. Рассмотрены особенности поведения формы распределений, построенных на временных интервалах электрокардиосигнала. Результаты оценки формы распределений позволяют поддержать принятие обоснованного решения при установлении диагноза заболевания. Разработан способ оценки справедливости центральных моментов высокого порядка для статистического распределения, базирующийся на вычислении оценок качественного соответствия сортированной выборки результатов ЭКГ и аппроксимирующего разложения по степеням. Разработана методика разложения монотонной изменяющейся функции в степенной ряд, основанная на получении коэффициентов ряда с помощью центральных моментов n -го порядка, вычисленных по случайной выборке данных. Даны примеры аппроксимации сортированных рядов для типичного электрокардиосигнала и для известных симметричного и несимметричного распределений.

Электрокардиосигнал; центральный момент n -го порядка; сортированный ряд; статистическое распределение.

V.G. Polosin

WAY OF THE STATISTICAL ANALYSIS OF ELECTROCARDIOGRAPHIC INFORMATION

The possibility of increasing the efficiency of the automatic electrocardiographic information analysis, based on the using modern statistical methods of the information analysis containing in the selection results of measurements is considered. In particular, the interrelationship of kinetics changes ECG results and the distribution shape of the sample random variables ob-

tained in one period of heart contraction is shown. The method of the analyzing cardiographic information, based on an evaluation of the central moments of a high order for the statistical distribution of results obtained during the one period of the heartbeat is offered. The behavior peculiarities of the distributions shape constructed on time intervals (slots) electrocardiosignal are considered. The results of an estimation of the distributions shape allow supporting acceptance of the well-founded decision in the case of establishment diagnosis of disease. The way of a validity estimation of the central moments the high order for the statistical distribution based on the calculation of quality compliance estimations assorted sample of an electrocardiogram results and approximating decomposition on degrees is developed. The technique of decomposition of variable monotonic function in an ascending power series based on the coefficients of getting through central moments of n-th order calculated on a random sample of data is developed. Examples of assorted series approximation for a typical electric cardiosignal and for known symmetric and asymmetric distributions are given.

Electric cardiosignal; the central moments of n-th order; the assorted series; the statistical distribution.

Введение часть. Заболевания сердечно сосудистой системы (ССС) – одна из основных причин смертности взрослого населения в России. Огромные социально-экономические потери общества из-за болезней ССС, определяют повышенное внимание специалистов к решению проблем диагностики, позволяющие своевременно установить наличие сердечно-сосудистых заболеваний и обеспечить мероприятия по предупреждению развития болезни или по оказанию кардиологической помощи [1, 2]. Среди многообразия методов диагностики ССС электрокардиография остаётся самым доступным и распространённым методом исследований в клинической кардиологии, особенно при неотложных состояниях [3]. Важнейший этап диагностических исследований ССС связан с обработкой ЭКГ информации, возможности которого позволяют выделить характерные признаки заболевания на ранних этапах его развития и повысить эффективность его профилактики или лечения. В этой связи актуально развитие направления так называемой компьютерной электрокардиографии, позволяющей в автоматическом режиме обнаружить заболеваний ССС и сделать предварительный диагноз по результатам ЭКГ [4, 5].

Автоматизация процесса анализа ЭКГ сопряжена с рядом проблем, связанных с измерением сигналов низкого уровня на фоне воздействия внешних помех, что обуславливает низкую эффективность современных методов автоматического анализа кардиографической информации [6, 7].

В современной литературе в различных областях достаточно часто используются методы анализа информации, основанные на оценке моментов статистических распределений [8, 9, 10, 11]. Возможность применения подобных методов ограничена проблемой оценки соответствия найденных моментов распределения реальной выборке значений. Дело в том, что оценки моментов чувствительны к случайным выбросам, обусловленным мощными внешними воздействиями. В этом случае формы распределений, полученные для распределений случайных величин на основе моментов высокого порядка, не позволяют получить справедливую форму распределения для исследуемой выборки результатов. Для установления формы распределения на основе центральных моментов высокого порядка необходим механизм оценки адекватности найденных моментов исследуемому распределению.

Рассматривается возможность повышения эффективности автоматического анализа электрокардиографической информации, базирующийся на применении моментов высокого порядка к выборке результатов, и разработан механизм оценки соответствия центральных моментов исследуемому распределению по аппроксимации сортированной выборки результатов. На примере исследования статистики ЭКГ результатов одного Р-зубца показана возможность анализа его формы и установление диагноза по значениям эксцесса и асимметрии.

Способ анализа электрокардиографической информации.

С точки зрения стороннего наблюдателя, способного контролировать только начало и окончание циклов сокращения сердца, полученные результаты измерений ЭКГ в течение одного цикла представляют собой выборку случайных значений, которая содержит информацию о характере процесса, неявно выраженную в форме статистической кривой распределения значений выборки. Применение методов статистического анализа к выборке случайных результатов измерений ЭКГ, полученных за один цикл работы сердца, позволяет выделить информацию об особенностях всего процесса и отдельных его составляющих.

Типичный сигнал ЭКГ, записываемый в течение одного сокращения сердца, показан на рис. 1 в виде сплошной линии 1, где $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$, – интервалы времени, соответствующие зубцам Q - R - S комплекса, $\Delta t_4, \Delta t_6$ – интервалы времени кардиоцикла, соответствующие зубцам T и P соответственно; Δt_5 – T - P интервал времени относительного покоя активности миокарда.

Иллюстрация перехода от переменного во времени сигнала ЭКГ к гистограмме распределения результатов измерения дана на рис. 2,а, где области значений, отражающих характерные составляющие интервалов времени для активности сердца, выделены различными оттенками и имеют такие же обозначения, как и на рис. 1. Вероятность попадания значения в интервал $[U_i, U_i+\Delta U]$ определяется как отношение количества значений, находящихся в этом интервале, к полному числу значений в выборке сигнала, анализируемого за период одного цикла сокращений.

Изменение активности сигнала в характерные интервалы времени приведёт к перераспределению статистических параметров выборки, что отразится на изменении формы выборки распределения результатов. При этом информация о составе выборки и её изменении содержится в её параметрах, среди которых следует выделить центральные моменты s -го порядка $\mu_s(U)$ случайных значений выборки ЭКГ U . Оценка центральных моментов позволяет судить о форме гистограммы распределения и, как следствие, об состоянии сердца. Возможность установления формы распределения по результатам анализа оценок центральных моментов широко рассмотрено в современной литературе [9, 12].

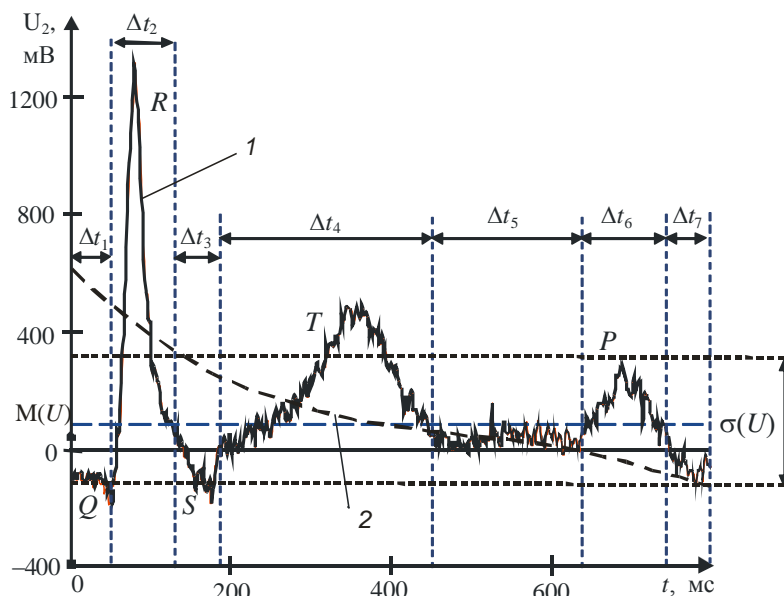


Рис. 1. Электрокардиограмма одного периода сокращения сердца

Сущность способа статистического анализа электрокардиографической информации состоит в описании ЭКГ по параметрам гистограммы распределения, построенной по результатам измерения одного цикла работы сердца. Центральные моменты n -го порядка позволяют получить аппроксимацию сортированного ряда выборки значений сигнала ЭКГ за время цикла, заданную для i -го значения u_i сортированного ряда в форме разложения по степенным составляющим s -го порядка вида:

$$u_i = Me(U) + \sigma(U) \frac{\tau_{1/2} - t_i}{\Delta\tau} \cdot \left(1 + \sum_{s=3}^n \left(\frac{\mu_s(U)}{(\mu_2(U))^s} \cdot \frac{(\tau_{1/2} - t_i)^{s-2}}{\Delta\tau^{s-2} \cdot (s-1)!} \right) \right), \quad (1)$$

где $Me(U)$, $M(U)$ и $\sigma(U)$ – медиана, математическое ожидание и среднее квадратическое отклонение выборки U случайных значений ЭКГ; $\tau_{1/2}$ – интервал времени, равный половине периода τ_n одного сердечного сокращения и рассчитанный как половина суммы всех характерных составляющих интервалов времени одного периода ЭКГ; $\Delta\tau$ – варьируемый интервал времени, найденный из соотношения:

$$\Delta\tau = k \cdot \frac{\tau_n}{2 \cdot \sqrt{3}}$$

Здесь k – коэффициент вариации, найденный на основе методов минимизации отклонения для разности результатов вычисления с помощью выражения(1) и соответствующих им значений сортированного ряда выборки ЭКГ. Коэффициент вариации k , значения которого находятся в пределах от 1 до 3, позволяет изменять наклон аппроксимации в точке положения медианы сортированного ряда.

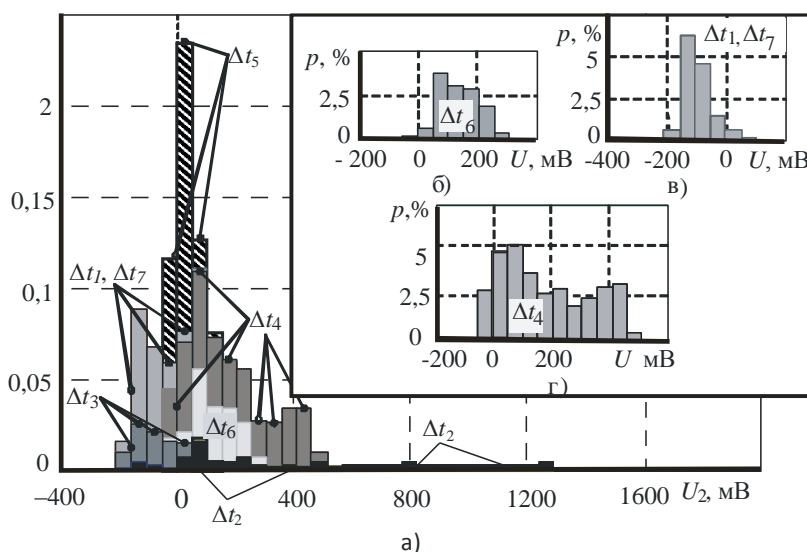


Рис. 2. Гистограмма распределения результатов одного сокращения сердца

Пример результата аппроксимации сортированного ряда значений для выборки U показан на рис. 3,а, где сплошная линия 1 иллюстрирует изменение значений ряда, пунктирная линия 2 получена с помощью выражения (1).

Аппроксимация построено при ограничении разложения до центрального момента 4-м порядка ($s=4$). В этом случае аппроксимация (1) принимает упрощенную форму вида:

$$u_i = Me(U) + \sigma(U) \left(\frac{\tau_{1/2} - t_i}{\Delta\tau \cdot 1!} + As(U) \frac{(\tau_{1/2} - t_i)^2}{\Delta\tau^2 \cdot 2!} + Ex(U) \frac{(\tau_{1/2} - t_i)^3}{\Delta\tau^3 \cdot 3!} \right), \quad (2)$$

где $As(U)$ и $Ex(U)$ – безразмерные коэффициенты асимметрии и эксцесса для случайных значений выборки U . Статистические параметры аппроксимации сортированного ряда, соответствующие сигналу рис.1, имеют значения: $k=2,25$; $Me(U)=66$ мВ; $\sigma(U)=218,8$ мВ; $As(U)=2,31$; $Ex(U)=10,82$; $\tau_n=797$ мс. При этом аппроксимация сортированного ряда значений рассматривается как регрессия поведения случайного сигнала ЭКГ, которая показанная на рис. 1 в виде пунктирной кривой 2. Полученная регрессия характеризует изменчивость сигнала ЭКГ в течение одного цикла.

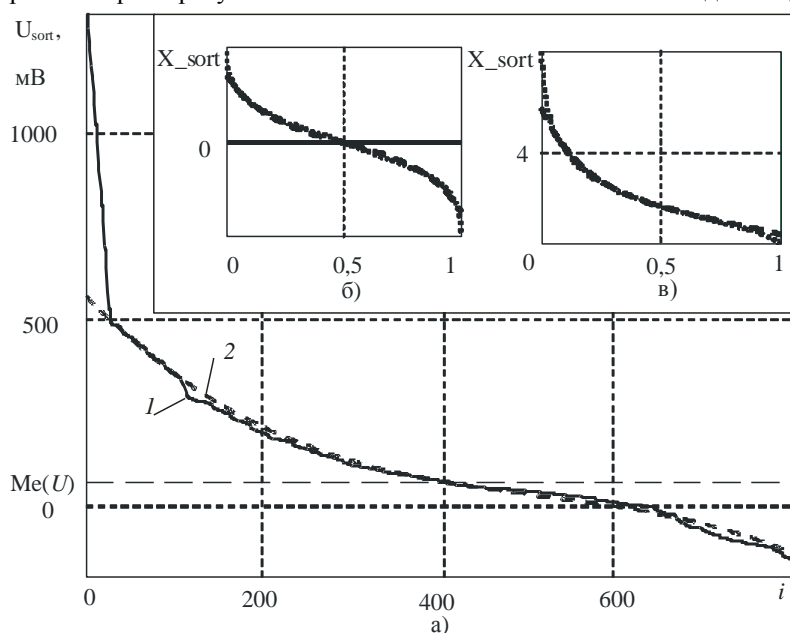


Рис. 3. Результаты аппроксимаций сортированных выборок

Обсуждение результатов. Для демонстрации возможности разложения (1) на рис. 3,б, в так же даны примеры аппроксимации сортированных выборок случайных результатов, соответствующих симметричному нормальному распределению и несимметричному гамма распределению. Приведённая погрешность аппроксимации не превысила 1 % при сохранении 95 % значений выборки сортированного ряда. Из приведённых примеров следует, что статистические параметры распределений позволяют эффективно находить коэффициенты разложения случайных функций в степенные ряды. При этом оценки качества полученных аппроксимаций для сортированных выборок значений применимы для решения задачи, состоящей в построении оценок адекватности найденных параметров распределений при их использовании для установления формы распределений выборки случайных значений ЭКГ.

Любое изменение в форме или длительности сегментов сигнала приведут к характерному изменению гистограммы, обусловленному перераспределением значений в выборке случайных результатов ЭКГ. Исследуя формы распределений значений всего сигнала или отдельных его сегментов возможно решение задачи, состоящей в установлении формы и длительности самих сегментов. В частности известно, что при уменьшении частоты сердечных сокращений увеличивается Т-Р интервал времени относительного покоя активности сердца. Так как при нормальной работе сердца промежуток времени электрической активности при одном сокращении не превышает 0,63 с, то при частоте сердечных сокращений порядка 65

ударов в минуту Т-Р интервал времени, будет равен 0,3 с. Следовательно на близкое к постоянному значению напряжения ЭКГ придётся 1/3 всех результатов, измеренных за одно сокращение сердца. Все эти значения будут расположены в одном или двух столбцах гистограммы, обуславливая высокий уровень оценки эксцесса распределения.

Уменьшение влияния изменения длительности интервала Т-Р достигается путём ограничения вероятности наблюдения значений на уровне 10 ...15 %, что качественно выражается в ограничении высоты столбиков гистограммы на этом уровне. В свою очередь, вероятности попадания случайных значений выборки результатов ЭКГ в другие интервалы следует увеличить пропорционально отношению количества изъятых из выборки значений к полному количеству значений в исходной выборке. Такое ограничение соответствует исключению значений ЭКГ для Т-Р-интервала времени из анализа сигнала.

Эффективность установления диагноза заболевания значительно повышается при применении статистического анализа электрокардиографической информации к выборкам сигнала, взятым за характерные промежутки времени. На рис. 2,б,в,г дана гистограмма распределения значений для Р, S и Т-зубцов, соответственно. Гистограмма на рис. 2,б соответствует распределению Вейбулла–Гнеденко, которое при повышении острровершинности сигнала стремится к нормальной форме; при появлении перекосов в сигнале стремится к экспоненциальным формам. Гистограмма на рис. 2,в определяется аддитивной смесью двух распределений, обусловленных переходными процессами зубца Q и острровершинным распределением, характерным интервалу Р–Q. Гистограмма на рис. 3,г состоит из аддитивной смеси двух распределений: равномерного и нормального распределений, обусловленных треугольной формой зубца и S-T-интервалом, соответственно. Изменение формы зубца или интервала приводит к изменению формы распределения, которая несёт информацию о состоянии миокарда и используется при установлении диагноза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Манак Н.А., Альхимович В.М., Гайдук В.Н. и др. Руководство по кардиологии. – Минск: Беларусь, 2003. – 624 с.
2. Русин В.В. Неотложная помощь на догоспитальном этапе: руководство для врачей. – СПб.: ИнфоМед, 2010. – 207 с.
3. Джанашия П.Х., Шевченко Е.М., Оливиенко С.В. Неотложная кардиология. – М.: Изд-во БИНОМ, 2010. – 288 с.
4. Титомир Л.И., Кнеппо П., Трунов В.Г., Айду Э.А.И. Биофизические основы электрокардио топографических методов. – М.: Физматлит, 2009. – 224 с.
5. Бодин О.Н. Методы и средства обработки кардиографической информации. Монография. – Пенза, 2008. – 350 с.
6. Кривоногов Л.Ю., Тычков А.Ю. Подавление помех в электрокардиосигналах на основе разложения по эмпирическим модем // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 8 (109). – С. 127-133.
7. Тычков А.Ю., Чураков П. П., Кривоногов Л. Ю. Автоматизированная система обработки и анализа электрокардиосигналов в условиях интенсивных помех различного вида // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2011. – № 1 (17). – С. 117-125.
8. Балахонова С.А., Бодин О.Н., Полосин В.Г. Использование регрессионного анализа для построения кривой восстановления миокарда // Мехатроника. Автоматизация. Управление. – 2013. – № 12. – С. 59-64.
9. Вадзинский Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям. – СПб.: Наука, 2001. – 295 с.

10. *Фёдоров М.В.* Метод идентификации форм распределений малых выборок // Российский химический журнал (ЖРХО им. Д.И. Менделеева). – 2002. – Т. XLVI, № 3. – С. 9-11.
11. *Яшин А.В., Лотонов М.А.* Выбор метода решения задачи идентификации законов распределения случайных погрешностей средств измерений // Измерительная техника. – 2003. – № 3. – С. 3-5.
12. *Новицкий П.В., Зограф И.А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 284 с.

REFERENCES

1. *Manak N.A., Al'khimovich V.M., Gayduk V.N. i dr.* Rukovodstvo po kardiologii [Guide cardiology]. Minsk: Belarus', 2003, 624 p.
2. *Rusin V.V.* Neotlozhnaya pomoshch' na dogospital'nom etape: rukovodstvo dlya vrachev [Emergency care prehospital: a guide for physicians]. St. Petersburg: InfoMed, 2010, 207 p.
3. *Dzhanashiya P.Kh., Shevchenko E.M., Olivshenko S.V.* Neotlozhnaya kardiologiya [Emergency cardiology]. Moscow: Izd-vo BINOM, 2010, 288 p.
4. *Titomir L.I., Kneppo P., Trunov V.G., Aydu E.A.I.* Biofizicheskie osnovy elektrokardio topograficheskikh metodov [Biophysical bases of electrocardio topographic methods]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 224 p.
5. *Bodin O.N.* Metody i sredstva obrabotki kardiograficheskoy informatsii [Methods and means of processing cardiographic information]. Monografiya. Penza, 2008, 350 p.
6. *Krivosnogov L.Yu., Tychkov A.Yu.* Podavlenie pomekh v elektrokardiosignalakh na osnove razlozheniya po empiricheskim modem [The suppression electrocardiograph based decomposition on empirical modem], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 8 (109), pp. 127-133.
7. *Tychkov A.Yu., Churakov P. P., Krivosnogov L. Yu.* Avtomatizirovannaya sistema obrabotki i analiza elektrokardiosignalov v usloviyakh intensivnykh pomekh razlichnogo vida [Automated processing and analysis of electrocardiogram under heavy interference of various types], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [News of Higher Schools. Volga region. Technical Sciences], 2011, No. 1 (17), pp. 117-125.
8. *Balakhonova S.A., Bodin O.N., Polosin V.G.* Ispol'zovanie regressionnogo analiza dlya postroeniya krivoy vosstanovleniya miokarda [Using regression analysis curve recovery of the myocardium], *Mekhatronika. Avtomatizatsiya. Upravlenie* [Mechatronics. The automation. Management], 2013, No. 12, pp. 59-64.
9. *Vadzinskiy R.N.* Spravochnik po veroyatnostnym raspredeleniyam [Handbook of probability distributions]. St. Petersburg: Nauka, 2001, 295 p.
10. *Fedorov M.V.* Metod identifikatsii form raspredeleniy malykh vyborok [Method of identification of the forms of the distributions of small samples], *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal (ZhRKhO im. D.I. Mendeleeva)* [Russian Chemical Journal (Journal of the Russian Chemical Society named after. D.I. Mendeleev)], 2002, Vol. XLVI, No. 3, pp. 9-11.
11. *Yashin A.V., Lotonov M.A.* Vybor metoda resheniya zadachi identifikatsii zakonov raspredeleniya sluchaynykh pogreshnostey sredstv izmereniy [The choice of method for solving the problem of identification of the laws of distribution of random errors of measurement], *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Technology], 2003, No. 3, pp. 3-5.
12. *Novitskiy P.V., Zoграф I.A.* Otsenka pogreshnostey rezul'tatov izmereniy [Estimation of errors of measurement results]. Leningrad: Energoatomizdat, 1985, 284 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.В. Рыжиков.

Полосин Виталий Германович – Пензенский государственный университет; e-mail: polosin-v@sura.ru; г. Пенза, ул. Красная, 40; тел.: 8412368266; кафедра физики; к.т.н.; доцент.

Polosin Vitaly Germanovitch – Penza State University; e-mail: polosin-v@sura.ru; 40, Krasnaya street, Penza, Russia; phone: 8412368266; the department of physics; cand. of eng. sc.; associate professor.