

Оценка вариабельности сердечного ритма на основе вероятностного анализа данных носимых биометрических устройств в системах поддержки кадровых решений

М. В. Алюшин¹, В. М. Алюшин², Л. В. Колобашкина³, В. Р. Парахин⁴

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Москва, Россия

¹MVAlyushin@MEPHI.ru, ²VMAlyushin@MEPHI.ru, ³LVKolobashkina@MEPHI.ru, ⁴VRParakhin@MEPHI.ru

Аннотация. Показано, что система поддержки кадровых решений позволяет повысить надежность человеческого фактора, что имеет важное значение для обеспечения безаварийного функционирования потенциально опасных объектов. Выделены две основные области применения систем поддержки кадровых решений – кадровый отбор при приеме на работу и управление надежностью человеческого фактора непосредственно в процессе профессиональной деятельности на производстве. Частота сердечных сокращений (ЧСС) и вариабельность сердечного ритма (ВСР) выделены в качестве наиболее информативных параметров, позволяющих объективно оценить текущее функциональное и психоэмоциональное состояние персонала. Обоснована актуальность применения носимых биометрических устройств в производственных условиях. Предложена методика оценки ВСР на основе вероятностного анализа данных таких устройств.

Ключевые слова: человеческий фактор; система поддержки кадровых решений; носимые биометрические устройства

I. ВВЕДЕНИЕ

ЧСС и ВСР являются одними из наиболее информативных характеристик текущего состояния сердечно-сосудистой системы человека, во многом определяющей состояние его здоровья [1-3]. Их регистрация и анализ обуславливают возможность создания систем поддержки принятия кадровых решений на основе объективной информации о функциональном и психоэмоциональном состоянии человека [4]. Данное обстоятельство имеет важное значение для осуществления кадрового отбора работников критических профессий, например, операторов управления АЭС и ТЭЦ, водителей скоростного транспорта, а также экипажей кораблей. Непрерывный мониторинг за динамикой изменения ЧСС и ВСР непосредственно в процессе трудовой деятельности дает возможность минимизировать вероятность возникновения техногенных аварий и катастроф на потенциально опасных объектах, обусловленных

человеческим фактором. Кроме этого, учет данных о состоянии авторов важных документов позволяет повысить надежность документооборота предприятия [5].

Среди основных задач, решаемых с помощью систем поддержки принятия кадровых решений, следует выделить кадровый отбор при приеме на работу и управление надежностью человеческого фактора непосредственно в процессе профессиональной деятельности. В настоящее время активно развиваются технологии измерения ЧСС и ВСР с помощью дистанционных неконтактных технологий, например, оптических [6-8]. Однако реальные производственные условия в ряде случаев затрудняют, либо делают невозможным применение таких технологий. Принципиальным, в этом плане, является уровень двигательной активности персонала.

Актуальным в этой связи является использование в качестве биометрических сенсоров современных носимых устройств, таких, как браслеты, часы и кулоны. К сожалению, многие модели таких устройств позволяют измерять только усредненные на некотором временном интервале значения ЧСС. Этот факт существенным образом ограничивает возможность использования таких устройств для создания систем поддержки принятия кадровых решений. Оценка ВСР на основе анализа результатов измерения ЧСС является актуальной задачей, решение которой позволит расширить номенклатуру применяемых биометрических устройств.

Целью исследования является разработка методики оценки ВСР на основе вероятностного анализа результатов измерения носимыми биометрическими устройствами усредненных значений ЧСС.

II. СОСТОЯНИЕ ДЕЛ В ДАННОЙ ОБЛАСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Одним из подходов к определению ВСР является анализ кардиограммы во временной области. Для этого обычно рассматривается изменчивость временных интервалов t_i между R-R зубцами (так называемые NN интервалы), что обеспечивает наилучшую точность измерений. Результатами такого анализа, являются:

Работа выполнена в рамках Программы повышения конкурентноспособности НИЯУ МИФИ

гистограмма распределения измеренных временных интервалов $G(t_i)$, вариационный размах (разница между максимальным и минимальным временными интервалами), степень различия ночных и дневных данных и ряд других. Полученные результаты являются основой для выработки медицинского заключения о состоянии здоровья.

Основными характеристиками получаемой гистограммы $G(t_i)$ являются:

- RRNN (мс) – математическое ожидание – среднее значение длительности NN интервалов;
- SDNN (мс) – среднее квадратическое отклонение,
- RMSSD (мс) – среднее квадратичное различие между длительностью соседних R-R интервалов.

SDNN является одним из основных показателей ВСП при осуществлении мониторинга ЧСС в течение длительного периода времени, например, в течение 24 часов. RMSSD является мерой ВСП с малой продолжительностью общего времени мониторинга ЧСС. В общем случае справедливо соотношение (величина ЧСС измеряется в числе сердечных сокращений в минуту):

$$\text{ЧСС} = 60 \cdot 1000 / \text{RRNN}.$$

Таким образом, проблема применимости носимых биометрических устройств, в первую очередь, определяется возможностью определения значения SDNN на основе данных о средних значениях ЧСС. Проблема усугубляется тем фактом, что для большинства носимых биометрических устройств величина интервала усреднения, как правило, неизвестна.

III. СУЩНОСТЬ ПРЕДЛАГАЕМОГО ПОДХОДА

В данном исследовании предлагается методика, позволяющая осуществить оценку величины SDNN на основе разработанной обобщенной модели работы алгоритма определения средних значений ЧСС. Как показали проведенные исследования, анализируемый алгоритм является типичным для большинства носимых биометрических устройств.

На рис. 1 проиллюстрирована работа алгоритма по определению средних значений ЧСС. На рис. 1 качественно показано положение R-зубцов кардиосигнала на временном интервале интегрирования T_0 .

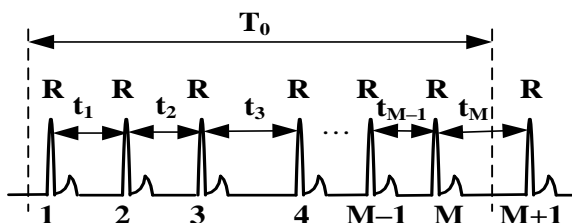


Рис. 1. Определение среднего значения ЧСС на временном интервале T_0

В силу того, что положение временных интервалов $t_1 \div t_M$ на промежутке T_0 носит случайный характер, число R-зубцов, зарегистрированных в пределах данного промежутка, будет иметь разброс. Так, например, если всегда $t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_{M-1} + t_M = T_0$, то вероятность того, что при измерении все $M+1$ зубцов R окажутся внутри интервала T_0 , равна нулю.

На рис. 2 представлены зависимости вероятности $P^1_{K=M+1}(\Delta)$ того, что в пределах промежутка T_0 при проведении измерений с помощью носимого биометрического прибора окажется $K=M+1$ равномерно расположенных R-зубцов ($t_1=t_2=t_3=\dots=t_{M-1}=t_M=t_0$), а также вероятности $P^2_{K=M}(\Delta)$ того, что $K=M$.

Величина Δ ($0 \leq \Delta < 1$) определяется следующим образом:

$$\Delta = T_0 - M \cdot t_0,$$

где $M = \lfloor T_0 / t_0 \rfloor$ – число полных временных интервалов t_0 в интервале интегрирования T_0 .

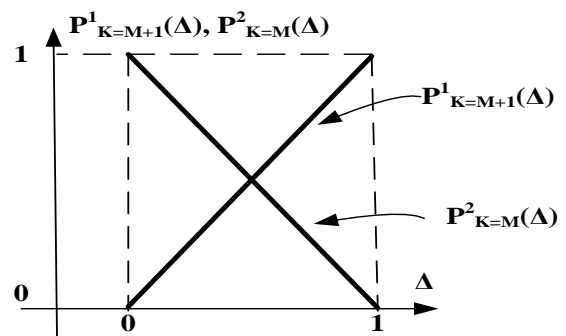


Рис. 2. Вероятность регистрации R-зубцов на интервале T_0

Очевидно, что в случае $T_0 = (M+1) \cdot t_0$ ($\Delta=0$) вероятность того, что $K=M+1$ минимальна $P^1_{K=M+1}(\Delta)=0$. При этом вероятность того, что $K=M$ максимальна $P^2_{K=M}(\Delta)=1$.

Рассмотренная модель позволяет определить запрограммированную в алгоритме конкретного носимого биометрического устройства величину промежутка T_0 . Для этого достаточно осуществить эмуляцию с помощью программно-аппаратных средств кардиосигналов с постоянной частотой F и осуществить подсчет на интервале $T \gg T_0$ числа измерений $L1$, имеющих значение $\text{ЧСС} = \alpha \cdot F$, и числа измерений $L2$, имеющих значение $\text{ЧСС} = \alpha \cdot F - 1$ (α – целое число). Величина T_0 в этом случае будет содержать α полных интервалов длительностью $1/F$ и дробную часть интервала $1/F$:

$$T_0 = (\alpha + L1 / (L1 + L2)) / F.$$

Зависимости, представленные на рис. 2, получены для одинаковых временных интервалов $t_1 \div t_M$. При наличии в них разброса, обусловленного ВСП, данные зависимости изменяются. В этом случае сумма временных интервалов с вариациями может быть представлена на виде

$$t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_{M-1} + t_M = M \cdot t_m + \lambda,$$

где t_m – среднее значение длительности временных интервалов, λ – случайная величина. Их параметры определяются характеристиками RRNN и SDNN.

На рис. 3 показано изменение зависимости $P_{K=M+1}^1(\Delta)$ с учетом этого обстоятельства.

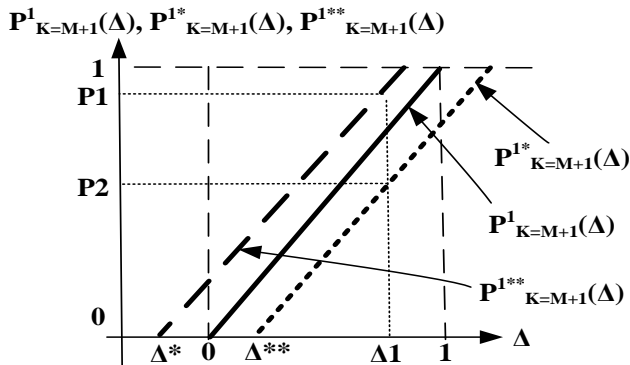


Рис. 3. Вероятность регистрации R-зубцов на интервале T_0

Разброс суммы интервалов $t_1 \div t_M$ обуславливает «размытие» зависимости $P_{K=M+1}^1(\Delta)$ в границах, определяемых функциями $P_{K=M+1}^{1*}(\Delta)$ и $P_{K=M+1}^{1**}(\Delta)$. В исследовании значения величин Δ^* и Δ^{**} определялись по правилу 3-х сигм при допущении о нормальном распределении величин $t_1 \div t_M$:

$$-\Delta^* = \Delta^{**} = 3 \cdot (M \cdot SDNN^2)^{0.5}.$$

Таким образом, зная величину разброса $\Delta^{**} - \Delta^*$ в измеренных значениях ЧСС, можно оценить параметр SDNN, характеризующий ВСР:

$$SDNN \approx ((\Delta^{**} - \Delta^*)^2 / (36 \cdot M))^{0.5}.$$

Значение $\Delta^{**} - \Delta^*$ определяется исходя из зарегистрированного разброса в значениях вероятностей – P1 и P2 для точки Δ_1 : $\Delta^{**} - \Delta^* \approx P1 - P2$. Для учета дисперсии D разброса значений величины K, обусловленных вероятностным характером попадания R-зубцов в интервал T_0 , в исследовании предложено учесть ее при оценке величины SDNN:

$$SDNN \approx (((\Delta^{**} - \Delta^*)^2 - D) / (36 \cdot M))^{0.5}.$$

Для верификации предложенного подхода был проведен комплекс экспериментальных измерений, включающий в себя два параллельных варианта измерений ЧСС и ВСР. Первый вариант включал в себя измерение ЧСС и ВСР инструментальными методами. Второй вариант осуществлял регистрацию ЧСС с помощью носимых биометрических устройств и оценку ВСР по разработанной методике. В обоих случаях тестируемые (75

человек) находились в состоянии покоя в кресле. Исследования подтвердили возможность оценки ВСР с точностью 17%. В случае активных движений тестируемых ошибка оценки ВСР возрастала до 37%, что, с нашей точки зрения, обусловлено появлением «паразитных» R-зубцов в биометрических устройствах, осуществляющих регистрацию фотоплетизмограммы, чувствительной к производимым движениям.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, разработанный подход дает возможность оценить величину важного биометрического параметра ВСР, что расширяет номенклатуру применяемых для создания систем поддержки принятия кадровых решений современных носимых биометрических устройств, ориентированных на применение в различных производственных условиях.

ВЫРАЖЕНИЕ БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность всем студентам, аспирантам и сотрудникам, принявшим участие в экспериментальной апробации рассматриваемого подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Nahshoni E, Aravot D, Aizenberg D, Sigler M, Zalsman G, Strasberg B, Imbar S, Adler E, Weizman A. Heart rate variability in patients with major depression // Psychosomatics. 2004, Mar-Apr. Vol. 45(2). P. 129–134.
- [2] Hjortskov N., Rissen D., Blangsted A.K., Fallentin N., Lundberg U., Søgaard K. The effect of mental stress on heart rate variability and blood pressure during computer work // European Journal of Applied Physiology. 2004. Vol. 92. P. 84–89.
- [3] Abildstrom S.Z., Jensen B.T. Heart rate versus heart rate variability in risk prediction after myocardial infarction // Journal of Cardiovascular Electrophysiology. 2003. Vol. 14, No. 2. P. 168–173. doi:10.1046/j.1540-8167.2003.02367
- [4] Alyushin M.V., Kolobashkina L.V., Khazov A.V. Selection of professional staff according to psychological characteristics with the help of methods developed on the basis of the decision-taking theory // Voprosy psikhologii. 2015. Vol. 3. P. 88-94.
- [5] Alyushin A.M. Assessment of a person's psychoemotional state by his signature on the document as the basis for his disavowal // Voprosy psikhologii. 2018. Vol. 2. P. 133-140.
- [6] Kranjec J., Beguš S., Geršak G., Drnovšek J. Non-contact heart rate and heart rate variability measurements: A review // Biomedical Signal Processing and Control. 2014. Vol. 13. P. 102–112.
- [7] Sikdar A., Behera S.K., and Dogra D.P. Computer-vision-guided human pulse rate estimation: a review // IEEE reviews in biomedical engineering. 2016. Vol. 9. P. 91–105.
- [8] Verkruyse W., Svaasand L.O. and Nelson J.S. Remote plethysmographic imaging using ambient light // Optics express. 2008. Vol. 16. No. 26. P. 21434–21445.