

позволяет исследовать процессы в динамике, а также появляется возможность реализовывать системы с биологической обратной связью с целью коррекции состояний, связанных с нарушениями деятельности головного мозга.

## ANALYSIS OF ELECTROENCEPHALOGRAMS RHYTHMS BY MEANS OF NONLINEAR OPERATOR TEAGER-KAISER

A.O. KOZMIDIADI, A.P. KLUEV

### Abstract

The results of the development and application of methods for solution of applied tasks of analysis of the rhythmic activity of the electroencephalogram based on the nonlinear operator.

*Keywords:* electroencephalogram, nonlinear operator.

### Список литературы

1. Меклер А.А. // Матер. Всероссийская научн.-практ. конф. «Количественная ЭЭГ и нейротерапия»: Санкт-Петербург, 2007. С. 61
2. Сахаров В.Л., Андреев А.С. Методы математической обработки электроэнцефалограмм. Таганрог, 2000.
3. Зайченко К.В., Жаринов О.О., Кулин А.Н. и др. Съём и обработка биоэлектрических сигналов. Учебное пособие. СПб, 2001.
4. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. СПб, 1999.
5. Дьяконов В.П. // Контрольно-измерительные приборы и системы. 2009. № 2. С. 25–30.
6. Иваницкий Г.А. Распознавание типа решаемой задачи по нескольким секундам ЭЭГ с помощью обучаемого классификатора. Москва, 2007.
7. Kaiser J.F. // Proc. IEEE ICASSP'90 Albuquerque. New Mexico, April 1990. P. 381–384.
8. Kaiser J.F. // Proc. 4th IEEE Digital Signal Proc. New York, September 1990.

УДК 616.12-008.318-036.8

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОПЕРАТОРОВ АВИАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ОСНОВЕ СЕРДЕЧНОГО РИТМА

А.Г. ДАВЫДОВСКИЙ, А.И. АНДРЕЕВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Министерство обороны Республики Беларусь  
Куйбышева, 57, Минск, 200000, Беларусь*

*Поступила в редакцию 22 ноября 2016*

Представлены параметры сердечного ритма для анализа работоспособности операторов беспилотных авиационных комплексов. Предложены три математические модели динамики работоспособности и функциональной активности операторов на основе параметров сердечного ритма.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, оператор, беспилотные авиационные комплексы, работоспособность, функциональная надежность.

## Введение

Деятельность операторов беспилотных авиационных комплексов (БАК) характеризуется сменным характером, проявляющимся быстрыми взаимными переходами от длительной монотонии к активной умственной деятельности, сенсорной депривацией с социальным десинхронизмом, гиподинамией, информационным стрессом, обусловленным недостатком или избытком информации, необходимой для принятия актуальных решений по управлению БАК в условиях высокой информационной неопределенности. При этом эффективность деятельности операторов БАК зависит от их функциональной и профессиональной надежности. Функциональная надежность оператора БАК характеризует его функциональное состояние, детерминированное комплексом физиологических, психофизиологических, психологических и социальных факторов. Профессиональная надежность оператора определяет его способность выполнять профессиональные обязанности на требуемом уровне качества, точности, безотказности, своевременности, а также восстановления функциональных ресурсов организма. Для повышения профессиональной надежности операторов БАК большое значение имеет анализ «цены деятельности», которая характеризует степень истощения сил организма, риск снижения комплексной (функциональной и профессиональной) надежности и развития недопустимых (патологических) функциональных состояний, таких как хроническое утомление и переутомление [1]. При этом значительно возрастает частота ошибочных действий и время реагирования на изменения ситуации, риск развития стресса при пилотировании БАК и выполнении миссии, а в дальнейшем – психосоматических заболеваний. Этим обусловлено снижение работоспособности операторов БАК, динамика которой может быть охарактеризована на основе variability сердечного ритма (BCP) [2]. Показана связь между работоспособностью и, как следствие, – функциональной надежностью оператора и активностью его вегетативной регуляции BCP [3]. В связи с этим целью работы является математическое моделирование работоспособности и функциональной надежности операторов БАК на основе системного анализа параметров BCP.

### Параметры сердечного ритма для анализа работоспособности операторов

Мониторинг и прогнозирование работоспособности и функциональной надежности операторов БАК можно эффективно обеспечить на основе системного анализа параметров BCP. Причем изменение параметров сердечного ритма, изменение корреляционных связей между ними соотносится с изменением регуляторных влияний со стороны вегетативной нервной системы (ВНС). В частности, по исходному динамическому ряду RR интервалов вычисляются следующие статистические характеристики [4]:

- ЧСС (1/мин) – частота сердечных сокращений, средняя за период наблюдения частота, интегрально характеризующая уровень функционирования системы кровообращения;
- mRR (мс) – средняя длина R-R-интервала за период наблюдения длительность сердечного сокращения, интегрально характеризующая состояние системы кровообращения;
- sdRR (мс) – стандартное отклонение средней длины RR-интервала, является мерой соотношения мощностей высокочастотных и низкочастотных нейрогуморальных влияний, часто отождествляется с балансом активности парасимпатического и симпатического звеньев ВНС;
- RRNN – математическое ожидание (M) – среднее значение продолжительности R-R-интервала, обладает наименьшей изменчивостью среди всех показателей сердечного ритма, так как является одним из наиболее важных параметров организма и характеризует состояние его нейрогуморальной регуляции;
- SDNN (мс) – среднее квадратическое отклонение (СКО), является одним из основных показателей BCP; характеризует влияние блуждающего нерва на регуляцию сердечной деятельности;
- RMSSD (мс) – среднеквадратичное различие между длительностью соседних R-R интервалов, является мерой BCP с малой продолжительностью циклов;

–  $pNN50$  (%) – доля соседних синусовых RR-интервалов, которые различаются более чем на 50 мс, является отражением синусовой аритмии, связанной с дыханием;

– CV – коэффициент вариации ( $CV = (SKO \times 100) / M$ ), по физиологическому смыслу не отличается от среднего квадратического отклонения, но является показателем, нормированным по частоте пульса;

– Мо (мода) – диапазон наиболее часто встречающихся значений кардиоинтервалов. Обычно в качестве моды принимают начальное значение диапазона, в котором отмечается наибольшее число RR-интервалов. Иногда принимается середина интервала. Мо указывает на наиболее вероятный уровень функционирования системы кровообращения (точнее, синусового узла) и при достаточно стационарных процессах совпадает с математическим ожиданием. В переходных процессах значение Мо может быть условной мерой нестационарности, а значение Мо указывает на доминирующий в этом процессе уровень функционирования;

– АМо (амплитуда моды) – число кардиоинтервалов, попавших в диапазон моды (в %), величина амплитуды моды зависит от влияния симпатического отдела вегетативной нервной системы и отражает степень централизации управления сердечным ритмом;

– DX – вариационный размах (BP), максимальная амплитуда колебаний значений кардиоинтервалов, определяемая по разности между максимальной и минимальной продолжительностью кардиоцикла:

$$DX = RR_{\max} - RR_{\min} \quad (1)$$

Перечень основных параметров ВСР, которые могут быть использованы для мониторинга и прогнозирования функциональной надежности оператора БАК, достаточно широк и включает следующие [4, 5]:

– TI – триангулярный индекс как интеграл отношения плотности распределения к максимуму плотности распределения RR-интервалов;

– VAR (%) – коэффициент вариации, наиболее часто наблюдаемое значение уровня функционирования сердечно-сосудистой системы;

– MxDMn – разность между максимальным и минимальным значениями кардиоинтервалов – наиболее часто наблюдаемое значение мощности влияния симпатического звена нейрогуморальной регуляции;

– SI – индекс напряжения регуляторных систем – средняя частота за период наблюдения, интегрально характеризующая уровень функционирования системы кровообращения.

Для здоровых взрослых людей средние показатели вариационной пульсометрии составляют: Мо –  $0,80 \pm 0,04$  с и АМо –  $43,0 \pm 0,9$  %, BP –  $0,21 \pm 0,01$  с.

При спектральном анализе ВСР можно охарактеризовать три спектральных компонента, получившие названия высокочастотных (High Frequency – HF), низкочастотных (Low Frequency – LF) и очень низкочастотных (Very Low Frequency – VLF):

– HF (*s*-волны) – дыхательные волны или быстрые волны (0,4–0,15 Гц,  $T = 2,5$ –6,6 с), отражают процессы дыхания и другие виды парасимпатической активности;

– LF (*m*-волны) – медленные волны I порядка (МВI) или средние волны (0,15–0,04 Гц,  $T = 10$ –30 с) связаны с симпатической активностью (в первую очередь вазомоторного центра);

– VLF (*l*-волны) – медленные волны II порядка (МВII) или медленные волны (0,04 – 0,015 Гц,  $T > 30$  с) – разного рода медленные гуморально-метаболические влияния.

### Математическое моделирование функциональной надежности оператора

В настоящее время разработаны достаточно эффективные методы математического анализа ВСР. Наиболее перспективным является изучение ВСР с помощью методов нелинейного анализа, основанных на представлении о сердце как о сложной системе с большим количеством внутренних и внешних связей, которые могут быть исследованы с помощью аппарата теории хаоса, нелинейной динамики и самоорганизованной критичности [6]. Необходимо отметить, что методы оценки показателей ВСР объединены в 6

групп, включая методы временной области (статистические и геометрические), методы частотной области, автокорреляционные методы, нелинейные методы, методы независимых компонент, методы математического моделирования [7, 8].

В связи с этим предложены три математические модели, описывающие функциональную надежность и работоспособность оператора БАК.

Первая математическая модель, описывающая динамику функциональной надежности оператора БАК ( $P$ ) на основе индексов отношения разности фактического ( $g_{\text{факт}(i)}$ ) и нормативного значений ( $g_{\text{норм}(i)}$ ) параметров к нормативному значению:

$$\frac{dP}{dS} = -SP, \tag{2}$$

$$\text{где } S = \sqrt{\sum_i^n S_i^2}, \text{ причем } S_i = \frac{g_{\text{факт}(i)} - g_{\text{норм}(i)}}{g_{\text{норм}(i)}} \tag{3}$$

После интегрирования (3) можно получить выражение для количественной оценки вероятности снижения функциональной надежности оператора БАК:

$$P = 1 - \frac{P_{\text{max}}}{\sqrt{\exp(S^2)}}, \tag{4}$$

где  $P_{\text{max}}$  – максимально возможный уровень функциональной надежности оперативного персонала пунктов управления и применения беспилотных летательных аппаратов согласно нормативным требованиям ( $P \rightarrow 1$ ). С помощью численного моделирования формула вероятности снижения функциональной надежности оператора уточнена:

$$P = 1 - \frac{P_{\text{max}}}{\sqrt{\exp\left(\frac{S^2}{n}\right)}} \tag{5}$$

где  $n$  – количество исследуемых параметров ВСП для оценки и прогнозирования функциональной надежности оператора. Кроме того, показано, что, чем ниже уровень максимально возможной функциональной надежности ( $P_{\text{max}}$ ), тем выше вероятность ее снижения.

Вторая математическая модель позволяет рассмотреть связь функциональной надежности оператора и его работоспособности (*working capacity* – WC), обусловленной состоянием сердечно-сосудистой системы. В связи с этим предложена математическая модель, описывающая зависимость WC оператора БАК от вероятности надежного функционирования сердечно-сосудистой системы на основе оценки комплекса показателей ВСП с помощью векторной модели. При этом комплекс  $i$ -х параметров ВСП, соответствующих требуемой стандартной норме (*standard rate* – SN), может быть представлен вектором  $SR\{SR_1; SR_2; \dots; SR_i\}$ , а комплекс параметров ВСП, соответствующих некоторому фактическому функциональному состоянию (*functional state* – FS) – вектором  $FS\{FS_1; FS_2; \dots; FS_i\}$ .

В этом случае вероятность снижения работоспособности и, как следствие, – функциональной надежности ( $Q$ ) оператора БАК пропорциональна величине угла  $\varphi$  между векторами  $SR$  и  $FS$ :

$$Q = \cos \varphi = \frac{SR_1 FS_1 + SR_2 FS_2 + \dots + SR_n FS_n}{\sqrt{SR_1^2 + SR_2^2 + \dots + SR_n^2} \cdot \sqrt{FS_1^2 + FS_2^2 + \dots + FS_n^2}} \tag{6}$$

Для поддержания повышенной функциональной надежности оператора БАК важное значение имеет высокая общая (умственная и физическая) работоспособность WC, а также сравнительно низкие, в пределах нормы, значения критерия  $Q$  ( $0 \leq Q \leq 1$ ).

Поскольку WC может быть охарактеризована некоторой мультипараметрической функцией, то для упрощения дальнейших выкладок целесообразно рассмотреть зависимость WC от критерия  $Q$  в рамках третьей математической модели, задаваемой дифференциальным уравнением второй степени с постоянными коэффициентами:

$$\frac{\partial^2 WC}{\partial Q^2} + a \frac{\partial WC}{\partial Q} + bMWC = 0 \quad (7)$$

где  $a$  и  $b$  – постоянные. Подстановкой  $WC = \exp(ZQ)$  уравнение (7) сводится к характеристическому уравнению (8):

$$Z^2 + aZ + b = 0. \quad (8)$$

Поскольку корни уравнения (8) не равны друг другу, то общее решение имеет вид:

$$WC = C_1 \exp(Z_1 Q) + C_2 \exp(Z_2 Q), \quad (9)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные. Если  $Z_1 = Z_2 = Z$ , то общее решение:

$$WC = C_1 \exp(Z_1 Q) + C_2 \exp(Z_2 Q). \quad (10)$$

Анализ общего решения уравнения (7) свидетельствует о колебательной динамике функции  $WC$  в условиях напряженной профессиональной деятельности оператора БАК в зависимости от критерия  $Q$ .

При этом комплексная оценка риска снижения функциональной надежности ( $RISK_{\text{ФН}}$ ) оператора БАК может быть выражена дискретным уравнением:

$$RISK_{\text{ФН}} = 100 \cdot Q \cdot \sum_i^n (\omega_i \cdot \Omega_i \cdot r_i), \quad (11)$$

где  $Q$  – вероятность снижения функциональной надежности оператора БАК;  $\Omega_i$  – квадратный корень из квадрата величины отклонения  $i$ -го параметра ВСП ( $S_i$ ) от стандарта нормы;  $r_i$  – рейтинговая оценка  $i$ -го параметра ВСП, характеризующая значимость степени его отклонения от стандарта нормы;  $\omega_i$  – удельно-весовой коэффициент для произведения ( $\Omega_i, r_i$ ), которое фактически характеризует «область ЦДО».

Предложенные три математические модели, основанные на системном анализе ВСП, позволяют охарактеризовать как текущее, так и прогнозируемое состояние работоспособности и функциональной надежности оператора БАК. Кроме того, данные математические модели могут быть использованы для оценки риска развития сердечно-сосудистой патологии при продолжительных и интенсивных информационных и эмоциональных нагрузках и перегрузках в условиях профессиональной деятельности операторов БАК, а также других технических и производственно-технологических объектов и систем.

### Заключение

1. Разработаны три математических модели, позволяющие охарактеризовать и прогнозировать состояние работоспособности и функциональной надежности оператора БАК.

2. Предложены критерии ВСП для мониторинга, диагностики и прогнозирования динамики работоспособности и функциональной надежности оператора БАК. Данные критерии, наряду с психологическими, психофизиологическими, социально-психологическими и инженерно-психологическими критериями, являются базовыми при создании информационно-аналитических и экспертно-диагностических систем для мониторинга, прогнозирования и инженерно-психологического обеспечения работоспособности и функциональной надежности профессиональной деятельности операторов БАК.

3. Разработанные диагностические и прогностические критерии, а также математические модели, являются методологической основой психологического, психофизиологического, социально-психологического и инженерно-психологического сопровождения профессиональной деятельности оперативного персонала по управлению беспилотными авиационными системами различного назначения.

## SIMULATION OF THE OPERATOR WORKING CAPACITY OF UNMANNED AIRCRAFT COMPLEXES BASED ON CARDIAC RHYTHM

A.G. DAVIDOVSKY, A.I. ANDREEV

### Abstract

The number of parameters of the cardiac rhythm to analyze the health of operators of unmanned aircraft systems has been presented. Three mathematical models of the dynamics of health and functional operators activity made on the basis of parameters of cardiac rhythm were proposed.

*Keywords:* mathematical modeling, operators, unmanned aircraft systems, performance, functional reliability.

### Список литературы

1. Григорьева М.В. Психология труда. Конспект лекций. М., 2006.
2. Голухова, Е. З., Алиева А.М., Какучая Т.Т. и др. // Креативная кардиология. 2009. № 1. С. 76–82.
3. Машин В.А., Машина М.Н. // Вопросы психологии. 2002. № 2. С. 99–111.
4. Баевский Р.М., Черникова А.Г. // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2002. № 6. С. 11–17.
5. Баевский Р.М., Кириллов О.И., Клецкин С.З. Математический анализ изменений сердечного ритма при стрессе. М., 1984.
6. Gibelin P., Dadoun, Ph. Morand M. // Eur. Heart J. 1996. Vol. 17. P. 28.
7. Яблучанский Н.И., Мартыненко А.В. Вариабельность сердечного ритма. Харьков, 2010.
8. Баевский Р.М., Берсенева А.П. Оценка адаптационных возможностей организма и риск развития заболеваний. М., 1997.