

**СТАНДАРТ КОНФИГУРАЦИИ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ
РИТМА СЕРДЦА ПИЛОТА В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНОЙ РАБОЧЕЙ
НАГРУЗКИ**

д. т. н., проф. А. А. Терёшкин,
Украинский государственный учебно-сертификационный центр гражданской авиации

Исследованы спектры ритмов сердца пилотов при интенсивной рабочей нагрузке на этапе захода на посадку транспортного самолета в сложных метеоусловиях. Спектральная плотность мощности (СПМ) ритма сердца, как целостный объект, определен совокупностью 27 ординат в диапазоне частот 0,02 – 0,54 Гц с интервалами 0,02 Гц. Кластерным анализом выявлены особенности «тонкой» структуры СПМ ритма сердца пилота. Результаты поддерживаются обширным объемом исследования СПМ контингента пилотов регулярных воздушных линий и могут рассматриваться как статистически достоверный стандарт конфигурации СПМ ритма сердца пилота.

Обоснование и постановка задачи исследования. С 60-х годов в практику экспериментальных исследований рабочей нагрузки человека-оператора был введен термин «вариабельность ритма сердца» (ВРС), характеризующий физиологические реакции его организма. Водитель ритма сердца в синусовом узле рассматривался как интегральный импульсный частотный модулятор, выдающий сигнал автономной активности биологической системы человека. Строгое определение ВРС, информация о которой содержится во временных последовательностях R-R интервалов ЭКГ, может быть получено путем исследования гармонических компонент ритма сердца.

Особый интерес представляет структура ритма сердца пилота при интенсивных умственных нагрузках, связанных с переработкой большого объема информации пилотом при ручном управлении самолетом на наиболее ответственном и напряженном режиме полета - заходе на посадку по приборам. Механизмы, порождающие ВРС пилота при умственных нагрузках, обусловленных информационными процессами взаимодействия пилота со средствами отображения информации и органами управления в кабине самолета, не исследованы пока достаточно хорошо. В большинстве работ, выполненных с 1960-х годов и по настоящее время, указывается, что психофизиология механизмов, формирующих СПМ ритма сердца человека, до конца не изучена [1].

Современные практические исследования спектра ВРС в полевых и лабораторных условиях, как правило, выполняются с использованием стандартного биомедицинского оборудования и его фирменного программного обеспечения. При этом ВРС оценивается непараметрически числовыми значениями части общей дисперсии в двух полосах частот – «средней» (в диапазоне 0,06 – 0,14 Гц) и «высокой» (в диапазоне 0,15 – 0,40 Гц). Именно

поэтому, очевидно, в комплексных исследованиях психофизиологических реакций организма пилотов, например [2, 3], уменьшение дисперсии ВРС пилотов в обеих полосах частот оказывается значимым только для сегментов взлета и посадки. На других сегментах полета, с существенно отличающимися режимами и видами используемого бортового навигационного и пилотажного оборудования самолета, достоверные изменения дисперсии ВРС не наблюдаются. Следовательно, такой подход не позволяет выполнять «тонкий» анализ СПМ и приводит к потере разрешающей способности и чувствительности физиологического метода в целом.

СПМ пилотов были вычислены и классифицированы параметрическими методами. Их достоинством являются: 1) более гладкие и хорошо различимые спектральные компоненты; 2) простая обработка полученных ординат и идентификация основной частоты каждого компонента; 3) точная оценка СПМ исходного процесса при условии его стационарности.

В данной работе была поставлена задача: исследовать «тонкую» структуру СПМ пилота и классифицировать ее содержание.

Экспериментальные исследования проводились на сертифицированном Государственной авиационной администрацией комплексном тренажере транспортного самолета с двумя турбовинтовыми двигателями, пилотируемого летным экипажем регулярных воздушных линий в составе трех членов: пилота – командира ВС, второго пилота и бортового инженера. Экипаж выполнял заход на посадку по правилам полетов по приборам при метеоусловиях I категории с использованием стандартных радиотехнических средств. Регистрация электрокардиограммы пилота – командира осуществлялась медико-биологической аппаратурой от момента пролета ДПРМ до торца ВПП в течение 60 с. В исследовании участвовал 41 летный экипаж, выполнивший по 10 заходов на посадку при нормальных условиях полета. Все члены экипажей, допущенные к исследованиям, имели медицинский сертификат годности и действующие летные свидетельства для выполнения полетов на регулярных воздушных линиях.

Обработка и представление данных. Спектральный анализ ритма сердца пилотов выполнялся с помощью специально разработанной компьютерной программы. Исходная информация для расчета корреляционной функции и СПМ задавалась последовательностями R-R интервалов, зарегистрированных для каждого пилота в 10 заходах на посадку. Суммарная длительностью регистрации ЭКГ составляла 600 с. Модулированные во времени последовательности R-R интервалов были преобразованы и интерполированы в непрерывную функцию частоты сердечных сокращений с постоянным шагом дискретизации 0,25 с. Это обеспечивало в исследованиях максимальную

разрешающую частоту в СПМ ритма сердца вплоть до $f_{\max} = 2,0$ Гц. После процедуры извлечения тренда центрированные реализации «сшивались» в одну последовательность, имеющую нулевое математическое ожидание.

При решении классификационной задачи о структуре СПМ ритма сердца пилотов были использованы следующие методы:

1) теоретические методы предсказания структуры исследуемого объекта – СПМ пилота - на основании известных психофизиологических положений о взаимодействии и регуляции различных подсистем организма человека и тем самым определяющие его возможную декомпозицию;

2) методы распознавания образов для установления структурных особенностей исследуемого «неизвестного» объекта посредством статистического анализа;

3) информационный поиск, основанный на сравнении особенностей СПМ ритма сердца пилота, как «неизвестного» объекта, с опубликованными в научной литературе идентифицированными объектами.

На рис. 1 представлен график нормированной СПМ ритма сердца, полученный путем осреднения ординат СПМ 41 пилота-командира. На нем вертикальными линиями ограничены доверительные интервалы СПМ при доверительной вероятности 0,95.

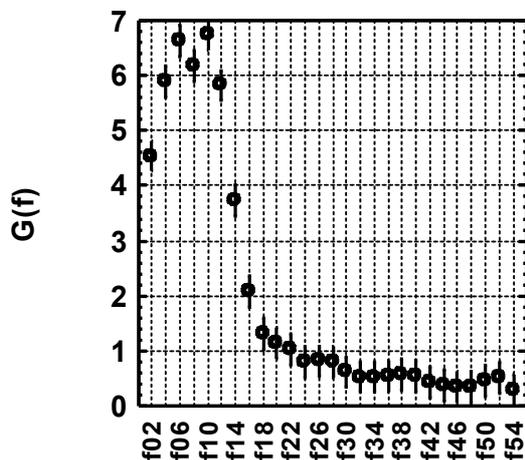


Рис. 1. Осредненные ординаты графика СПМ ритма сердца контингента пилотов

Из рис. 1 следует, что СПМ бестрендового процесса в ритме сердца пилота - командира ВС на траектории снижения самолета по глиссаде действительно является полигармоническим процессом, имеющим три выраженных пика: на основной частоте 0,1

Гц и пики на частотах 0,28; 0,38 и 0,52 Гц. При этом основной вклад в дисперсию R-R интервалов (около 75%) вносят колебания в диапазоне основной частоты от 0,02 до 0,16 Гц, которые формируют ее главный пик.

Обоснование частотных границ СПМ. Можно предположить, что СПМ ритма сердца пилота содержит обширную информацию, охватывающую широкую гамму процессов, простирающихся от элементарного жизнеобеспечения организма функционирования человека, как биологического объекта, вплоть до энергетического обеспечения процессов высшей нервной деятельности пилота как человека-оператора. Ординаты СПМ вычислялись параметрическими методами в диапазоне частот от 0,02 до 2,0 Гц. Максимальное значение частоты в СПМ некоторых пилотов достигало 0,68 Гц.

При лабораторных и клинических условиях при анализе коротких записей ЭКГ (от 2 до 5 минут) обычно различают три главных спектральных компонента: очень низких частот до 0,04 Гц, низких частот 0,04-0,15 Гц и высоких частот 0,15-0,4 Гц [3, 4]. Относительно компонента очень низких частот здесь отмечают неясность и спорность его физиологической сущности и специфического физиологического процесса, которому могут быть приписаны его колебания. Смысл этой компоненты является спорным, и поэтому в исследованиях рекомендуется избегать его интерпретации при спектральном анализе коротких ЭКГ. Таким образом, была определена нижняя СПМ для данных условий эксперимента.

Обзор индивидуальных СПМ пилотов показал, что график вероятности Р «обнуления» ординат СПМ на максимальной частоте f_{max} является затухающей функцией, представленной на рис. 2. График функции имеет критическую точку перегиба с координатами (0,55; 0,6).

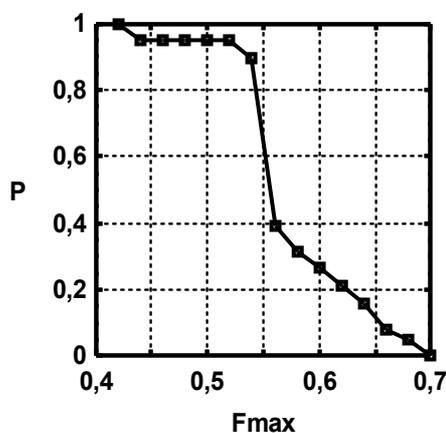


Рис. 2. Зависимость вероятности «обнуления» ординат СПМ пилотов от максимального значения частоты

Поэтому, исходя из соображений компромисса, была назначена вероятностная мера для принятия значения f_{\max} , при которой вероятность P не превышала бы значения 0,9. При таком выборе критерия максимальное значение частоты СПМ было принято равным 0,54 Гц.

Отражение частоты дыхания в СПМ. Поскольку в данном исследовании регистрация пневмограммы пилота не производилась, нами была использована косвенная информация о частотах сердечных сокращений (ЧСС), связанных с частотами дыхательных циклов (ЧД) летчиков, опубликованная в [4]. Информация была заимствована из таблиц экспериментальных данных в виде 28 пар значений ЧД и ЧСС летчиков, участвовавших в полетах на тренажере, при имитации различных условий и сложности выполняемых полетных заданий. На рис. 3 представлены поле корреляции и линия регрессии ЧСС на ЧД вида:

$$\text{ЧСС} = -8,762 + 1200,77 \cdot \text{ЧД} - 4838,88 \cdot \text{ЧД}^2 + 5944,46 \cdot \text{ЧД}^3 \quad (1)$$

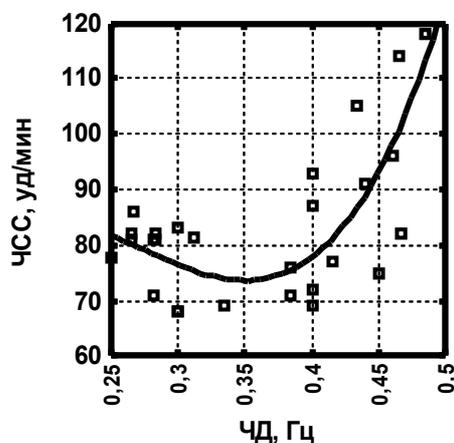


Рис. 3. Поле корреляции и линия регрессии ЧСС на ЧД летчиков

На рис. 4 ось абсцисс графика частот СПМ совмещена с осью абсцисс графика ЧД, в сопоставимых масштабах. Левая ось ординат представляет здесь СПМ, а правой ось — частоту сердечных сокращений.

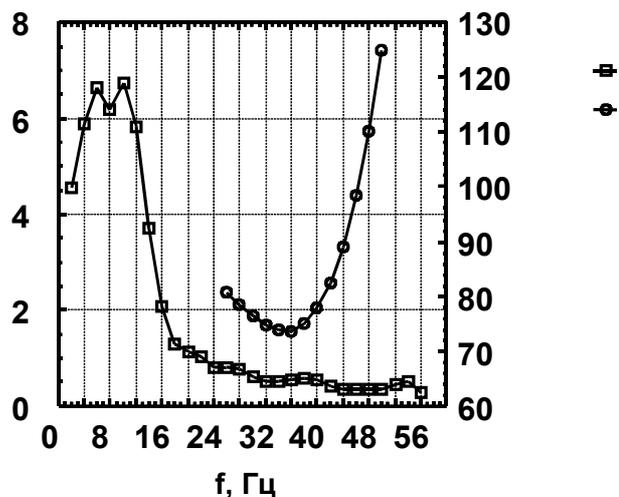


Рис. 4. Совмещенный график зависимостей СПМ, ЧД и ЧСС пилотов и летчиков
(левая ось – ординаты СПМ кв.ед/Гц, правая ось - ЧСС уд./мин)

Рассмотрение совмещенных графиков показывает следующее:

- для летчиков существует минимальное значение ЧСС, равное 73,7 уд/мин, которому соответствуют частота СПМ пилотов и частота дыхательных циклов летчиков 0,34 Гц;

- крутизна левой ветви графика ЧСС = f(ЧД) относительно упомянутого минимума равна 100 (уд/мин)/Гц, а крутизна правой ветви существенно выше – 500 (уд/мин)/Гц. На правой ветви можно гипотетически указать предельный рабочий режим ЧД = 0,5 Гц при ЧСС = 125 уд/мин;

- в качестве особой точки – фокуса графика можно принять точку пересечения обеих касательных к ветвям графика ЧСС с координатами (f = 0,40 Гц; ЧСС = 67 уд/мин). При этом угол, под которым видны из фокуса обе касательные, составляет 58°;

- область частот дыхательных циклов летчиков находится в диапазоне 0,26-0,48 Гц на графике СПМ пилотов. Можно полагать, что эта область ограничена реальными физиологическими пределами организма летчиков, в которых функционировала их дыхательная система в условиях тренажерных экспериментов. Возможно, что вне этой области рабочих частот дыхательных циклов летчиков в экспериментах могли бы наблюдаться внешние признаки явлений кислородной недостаточности (левая ветвь графика) или гипервентиляции (правая ветвь графика).

Кластерный анализ структуры СПМ. Для последующего анализа, с учетом установленных выше ограничений, результаты измерений СПМ ритма сердца каждая выборка пилотов были представлены 27 – мерным вектором образа СПМ как «неизвестного объекта», где $X = (x_1, x_2, \dots, x_{27})$, где x_1 - амплитуда СПМ пилотов на частоте 0,02 Гц, ..., x_{27} - амплитуда на частоте 0,54 Гц.

Дисперсионный анализ СПМ пилотов разделил суммарную дисперсию на межгрупповую и внутригрупповую. Их F - отношение на уровне значимости менее 0,05 доказало наличие различий между статистическими средними значениями ординат СПМ при доверительном уровне 95%. Это позволило использовать для исследования структуры СПМ пилотов систему распознавания образов, основанную на алгоритмах кластерного анализа.

Процедуры кластеризации выполнены методом Дж. Уорда [6] с использованием метрики квадрата евклидова расстояния. Из дендрограммы на рис. 5 следует, что структура СПМ ритма сердца пилотов состоит из трех кластеров, включающих ординаты СПМ низкой частоты С1 (0,02- 0,16 Гц), средней частоты С2 (0,18–0, 40 Гц) и высокой частоты С3 (0,42–0,54 Гц).

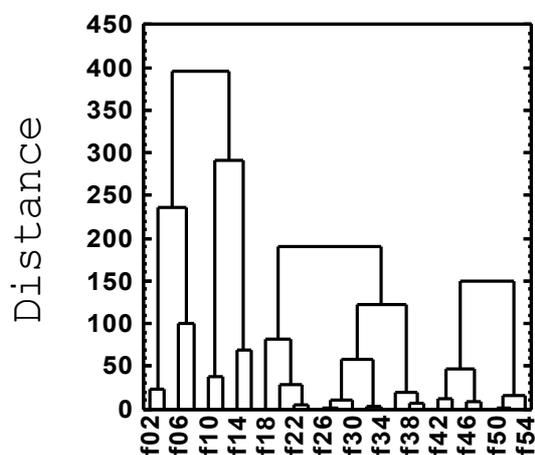


Рис. 5. Дендрограмма образа СПМ ритма сердца пилотов

Рассматривая содержание частот кластера С1, отметим его соответствие форме главного пика СПМ. Существенной особенностью пика является его расщепление на частоте 0,08 Гц. Частоты 0,02-0,04 Гц соответствуют крутизне переднего фронта пика

СПМ. Частоты 0,06-0,08 Гц отражают вариабельность левого зубца главного пика и высоту ординаты СПМ, на которой пик оказывается расщепленным. Верхняя граница СПМ формируется на частотах 0,10-0,12 Гц. Частоты 0,14-0,16 Гц определяют крутизну заднего фронта главного пика СПМ. Основная причина расщепления главного пика СПМ, возможно, состоит в том, что регулирование артериального давления в организме человека осуществляется двумя ведущими системами – симпатической и парасимпатической, которые имеют разные рабочие частоты.

В состав кластера С2 входят два подкластера: С21 и С22. В подкластере С22 присутствуют ординаты СПМ пилотов с частотами 0,26–0,40 Гц, предположительно отражающие влияние частот дыхательных циклов пилотов. Содержание подкластера С21 включает совокупность ординат СПМ пилотов в диапазоне частот 0,18–0,24 Гц, которое на графике СПМ представляет собой особое образование, названное нами «наплывом». Очевидно, что «наплыв» является переходной областью СПМ, связывающей между собой в единую структуру организма процессы в различных, но функционально объединенных подсистемах регуляции частоты артериального давления и частоты дыхания, действующих на различных, «разнесенных» частотах. Установлено, что в области выделенного фрагмента частот в подкластере С21 наплыв СПМ описывается уравнением линейной регрессии вида:

$$\text{«Наплыв»} = 2,8 - 8,25 * f \quad (2)$$

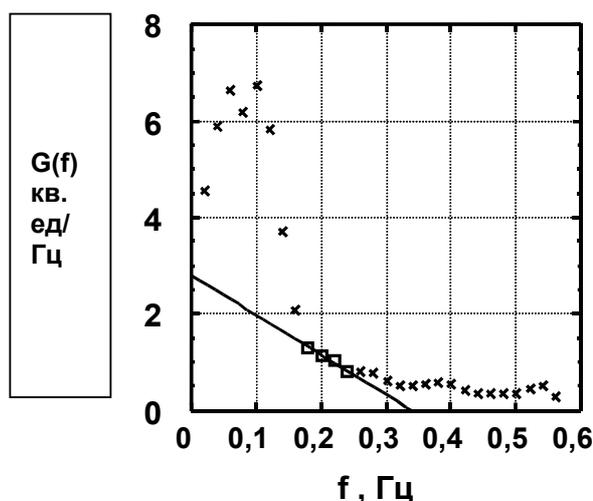


Рис. 6. Линия регрессии «наплыва» на графике СПМ пилотов

Положение линии регрессии «наплыва» относительно остальных фрагментов на графике СПМ пилотов показано на рис. 6.

Для выявления особенностей протекания графика СПМ в области средних и высоких частот было построено уравнение регрессии третьего порядка на ординатах опорных точек СПМ в диапазоне частот 0,26–0,54 Гц, включенных в кластерные структуры С22 и С3, вида:

$$\text{Спектр} = 3,33957 - 0,178385 \cdot f + 0,00363748 \cdot f^2 - 0,0000255485 \cdot f^3 \quad (3)$$

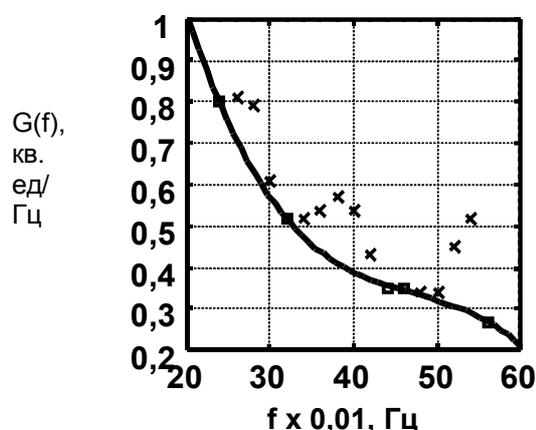


Рис. 7. Линия регрессии, построенная на ординатах опорных точек СПМ в диапазоне частот 0,24 – 0,56 Гц

Вычтя из значений ординат СПМ, значения, соответствующие уравнению регрессии, получим в чистом виде структуру этого фрагмента графика в диапазоне частот 0,26–0,54 Гц, представленную на рис. 8.

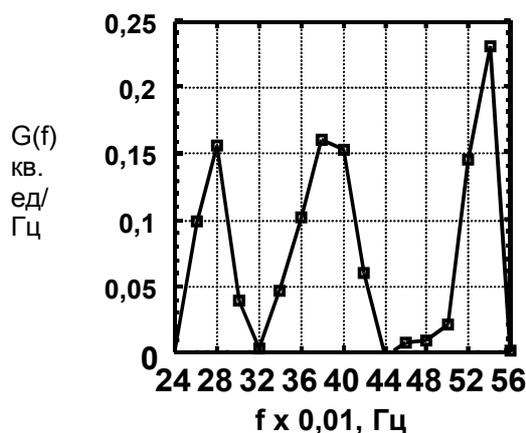


Рис. 8. Конфигурация пиков в структуре СПМ в диапазоне частот 0,24–0,56 Гц

Из графика видно, за областью наплыва следуют три пика СПМ на частотах 0,28; 0,38 и 0,54 Гц. Обращаясь к исследованиям [5], отметим наличие влияния выполняемых режимов полета и решаемых задач на ЧД летчиков. Здесь было установлено, что оперативному покою летчика соответствует частота дыхания не более 0,26 Гц (15,6 циклов/мин). Интенсивные частоты дыхания были отнесены к диапазону частот 0,26–0,40 Гц (15,6–24 циклов/мин). Частоты напряженных дыханий занимали диапазон 0,42–0,52 Гц (25,6–31,2 циклов/мин). Простые для летчиков задачи сопровождались умеренной ЧД, равной 0,32 Гц (18,7 Гц). При имитации неожиданных отказов авиационной техники ЧД достигала 0,48 Гц (29 циклов/мин). Естественно предположить, что наличие явно выраженного пика СПМ пилотов на частоте 0,54 Гц может быть вызвано не только дыхательными экскурсиями грудной клетки пилотов, но и интенсивной интеллектуальной нагрузкой, обусловленной задачей пилотирования самолета. Возможно, что частота третьего пика СПМ, равная 0,54 Гц, находится вне сферы биологических процессов обеспечения жизнедеятельности пилотов. Отмеченное явление подлежит более тщательным исследованиям.

Заключение

Результаты выполненного исследования, относящиеся к сфере спектрального анализа ритма сердца пилотов, могут быть рекомендованы для включения в специальную авиационную справочную психофизиологическую литературу как *Стандарт конфигурации спектральной плотности мощности ритма сердца пилота в условиях интенсивной рабочей нагрузки.*

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sayers B. M.* Analysis of heart rate variability. *Ergonomics* 1973; 16: 17 – 32.
2. *Wilson G. F.* An analysis of mental workload in pilots during flight using multiple psychophysiological measures. *International Journal of Psychophysiology*, 12(1), 3 – 18, 2001.
3. *Wilson G. F.* Psychophysiological test methods and procedures. In S.G. Charlton & T.G. O'Brien (Eds.), *Handbook of human factors testing and evaluation* (2nd ed., pp. 127-156). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc. (2002).
4. *Malliani A., Pagani M., Lombardi F., Cerutti S.* Cardiovascular neural regulation explored in frequency domain. *Circulation* 1991; 84: 1482-92.
5. *Доброленский Ю. П., Завалова Н. Д., Пономаренко В. А., Туваев В. А.* Методы инженерно-психологических исследований в авиации. М.: Машиностроение, 1975, с. 280.
6. *Ward J.H.* Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Amer. Statist. Assoc.* Vol. 58, No. 301.