

Сигнатури ЕКГ і функціональний стан людини-оператора

Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ»

Для дослідження й ідентифікації функціонального стану людини-оператора запропоновано динамічні й енергетичні сигнатури ЕКГ, а також універсальні характеристичні ознаки й інтегративні показники цих сигнатур, які надають можливість виявити нову інформацію, що прихована в динаміці зміни функціонального стану оператора. Показано, що конфігурація та характер змін у пакеті сигнатур відображають особливості впливу внутрішніх і зовнішніх подразників на стан оператора.

Ключові слова: людина-оператор, ЕКГ, сигнатурний аналіз, функціональний стан, кардіоцикл, інтегративні показники, сенсори.

Мета й постановка задачі

Однією з основних причин катастроф на транспорті є людський чинник, а саме вплив функціонального стану (ФС) оператора, водія, пілота і т.п. на їх діяльність в екстремальних умовах. Залежність ФС оператора від внутрішніх і зовнішніх чинників сприяє неадекватному перетворенню і аналізу інформаційних потоків і, як наслідок, помилковим рішенням чи діям. Тому актуальною проблемою є визначення реакції організму оператора на зовнішні і внутрішні подразники [1]. З одного боку, вона пов'язана з неузгодженістю засобів отримання, оброблення й відображення інформації про індивідуальні зміни ФС оператора; з іншого – неоднозначність в оцінюванні діяльності оператора також пов'язана з індивідуальними особливостями зміни ФС людини, які найбільше виявляються в особливостях діяльності серцево-судинної системи, яка є своєрідним індикатором адаптаційно-приспосувальної діяльності організму [2,3]. Зокрема, відкидання артефактів робить неефективними спроби виявити й прогнозувати системні індивідуальні зміни ФС оператора в екстремальних умовах, наприклад, за допомогою програмно-апаратних комплексів («Динаміка-100», «Віта-кард» та ін.). У результаті неадекватності інтегративної оцінки ціни адаптації, а також труднощі з профвідбором, допуском до роботи й регуляцією стану оператора [4].

На наш погляд, основними причинами проблем функціональної діагностики є системні протиріччя: а) між методами отримання і оброблення діагностичної інформації; б) формою подання результатів і методами їх аналізу. Як наслідок, неузгодженість і неоднозначність при визначенні критичних ФС людини різними методами, а також відсутність орієнтирів для оцінювання динамічних змін в організмі. Отже, вирішення протиріч потребує нового бачення розв'язуваних проблем, перегляду процедур дослідження ФС оператора і оброблення, подання та аналізу їх результатів. На наш погляд, перспективним є перенесення в область функціональної діагностики людини підходів і засобів дослідження системних об'єктів із сусідніх галузей науки й техніки.

Дійсно, подібні проблеми – індивідуальність динамічної поведінки, успадковані властивості, артефакти, залежність від попередньої історії, раптовість відмов та інші були виявлені при використанні напівпровідникових сенсорів фізичних величин (детекторів і спектрометрів радіоактивного випромінювання і т.ін.) в екстремальних умовах [5]. Оскільки більшість проблем сенсорів пов'язана з індивідуальністю відклику як на зовнішні, так і на внутрішні збурення і мають

синергетичну природу, то їх вирішення досягнуто в рамках інформаційно-динамічного підходу [6]. В його основі – перетворення різних за природою функціональних характеристик сенсора у відповідні сигнатури фазового (динамічного) простору. Оскільки конфігурації сигнатур будь-яких характеристик являють собою замкнені послідовності дугоподібних ділянок і відрізняються між собою їх кількістю, кривизною і площею, то це дозволило розробити універсальні інтегративні показники, за допомогою яких виявляються грубі динамічні й тонкі інформаційні аспекти поведінки сенсорів в екстремальних умовах [7]. Завдяки порівнянню реальних сигнатур характеристик сенсора з типовими сигнатурами, що прийняті за еталон і зберігаються в інтегрованій базі даних, можна оперативно ідентифікувати теперішній стан сенсора і прогнозувати характер системних змін в екстремальних умовах [8]. Зазначимо, нарешті, що сигнатурний аналіз був створений для експрес-контролю працездатності мікросхем і широко використовується для ідентифікації й класифікації елементів електронної техніки і виявлення локальних порушень у них, не вникаючи в їх фізичну природу. Сьогодні його використовують також для ідентифікації та систематизації біооб'єктів, комп'ютерних вірусів тощо [9]. Важливо, що перетворення різних за природою характеристик системних об'єктів у відповідні сигнатури динамічного простору є по суті переходом від послідовності фізичних параметрів (відкликів, сигналів тощо) до підмножин динамічних станів, потужність яких є площею цих сигнатур [10]. Крім того, нові характеристичні ознаки, інтегративні показники і ентропійні критерії дозволяють порівнювати, оцінювати та системно аналізувати вплив різних за природою зовнішніх і внутрішніх чинників на працездатність сенсорів [11]. Очевидно, за допомогою сигнатур різних характеристик можна, не заглиблюючись в природу процесів, ідентифікувати й системно аналізувати результати досліджень не тільки сенсорів, але й інших складних системних об'єктів (біосенсорів, ЕКГ та інших характеристик ФС оператора тощо). Так, сигнатури ВАХ біологічно активних точок шкіри (БАТШ) подібні до сигнатур елементів електронної техніки (діодів, ємностей, нелінійних елементів і т.п.), а деякі з них є по суті біосенсорами [8, 15]. Тому перенесення інформаційно-динамічного підходу й сигнатурного аналізу в область функціональної діагностики та ергономіки надає нові можливості при дослідженні ФС оператора, що й було основною метою даної роботи.

Результати експерименту

У функціональній діагностиці операторів і спортсменів в останні роки стали широко використовувати програмно-апаратні комплекси. Зокрема, аналіз варіабельності серцевого ритму, вейвлет-аналіз ЕКГ, спектральний аналіз ЕКГ на площині комплексних частот та образного подання ритмічної структури записаних ритмограм (інтервалограми, скаттерограми тощо), аналіз дисперсії інтервалу Q - T, аналіз ЕКГ у фазовому просторі (спектрограми, хаосграми та інші) [12]. Вони надають нову важливу діагностичну інформацію, але при аналізі особливостей ФС не враховують індивідуальної динаміки кардіоциклу людини, що проявляється в неоднозначності й суперечливості результатів дослідження різними методами. Зауважимо, що при якісному аналізі форми зубців і статистичній обробці даних (величина зубців та їх тривалість), в яких відображаються особливості динаміки кардіоциклів, не враховують багатомодальність ЕКГ. Тому середнє значення, дисперсія та інші показники не можуть бути однозначними критеріями діагностичної оцінки послідовності ЕКГ, оскільки змінюється їх функція розподілу з

часом, при втомі, стресі чи магнітних бурях. Очевидно, результати таких досліджень недостатньо враховують динамічні аспекти ЕКГ і тому мало узгоджуються з ціною діяльності оператора, яка визначається ергономічними методами.

Більшість проблем функціональної діагностики операторів, що працюють в екстремальних умовах, пов'язана з індивідуальністю гомеостазу і мають синергетичну природу. Тому для їх вирішення скористаємось деякими алгоритмами інформаційно-динамічного підходу до дослідження напівпровідникових сенсорів. Дійсно, об'єднувальними чинниками сигнатур різних характеристик можуть бути елементи динамічної подібності їх конфігурацій, які можна порівняти і оцінити за допомогою універсальних характеристичних ознак та інтегративних показників. Для реалізації такого підходу нами розроблено спосіб отримання, оброблення і оцінювання ЕКГ, в якому всі зубці ЕКГ перетворюються у відповідні сигнатури динамічного і енергетичного просторів [13]. Одночасне вимірювання залежностей $V(t)$ (ЕКГ) і dV/dt (швидкості приросту чи спаду $V(t)$) дозволяє спостерігати на моніторі комп'ютера сигнатуру $V(t) - dV/dt$, яка є послідовністю динамічних станів кардіоциклу в динамічній площині $\{dV/dt, V\}$ (див. рис. 1,а). QRS-комплекс кардіоциклу, а також зубці Р і Т ЕКГ трансформуються в замкнені послідовності дугоподібних ділянок, які формують певну конфігурацію сигнатури. Вона відображає індивідуальні особливості електрофізіології серцевої діяльності як динамічної системи, в якій відображаються приховані коливальні процеси й тренди. Кількість дугоподібних ділянок N , їх довжина l і кривизна $C = 1/R$ (де R – радіус кривизни), а також площа конфігурації S і її ступінь асиметрії, є новими універсальними характеристичними ознаками ЕКГ. Вони виділяють парціальні внески коливальних складових кардіоциклу, характеризують їх узгодженість і ступінь взаємозв'язку. Для оцінювання цих внесків використано відносний показник $g_i = C_i \cdot S_j / l_i$ [14]. Порівняння внесків у послідовності сигнатур $V(t) - dV/dt$ ЕКГ оператора за допомогою g_i вказує на наявність як стійких, так і нестійких коливальних процесів. Параметр $G_j = \sum_i g_i$ є інтегральною оцінкою стану оператора.

Для функціональної діагностики, як виявилось, найбільш інформативними є сигнатури QRS-комплексів кардіоциклів першого–третього відведень, що, як правило, містять більше п'яти дугоподібних ділянок. Дійсно, конфігурація сигнатури QRS-комплексу є індивідуальною та найбільш чутливою до емоційного, фізичного і особливо до стресового стану людини, що дозволяє практично в режимі реального часу ідентифікувати ФС оператора. Так, проведені протягом шести місяців дослідження ФС 10 операторів (в тому числі й трьох спортсменів) віком від 20 до 65 років дозволили за допомогою сигнатур ЕКГ встановити: а) конфігурація сигнатури ЕКГ є індивідуальною характеристикою ФС людини; б) для кожної людини притаманний певний набір типових конфігурацій сигнатур ЕКГ, які інтегративно відображають різні рівні функціонування організму; в) сигнатури ЕКГ досить чутливі як до внутрішніх чинників (ліків, їжі й т.п.), так і до зовнішніх (магнітні бурі тощо). Їх конфігурація в динамічному просторі може закономірно змінюватися протягом дня, тижня, відображаючи індивідуальну здатність до перебудови з одного рівня функціонування на інший. Зауважимо, що досить інформативними є також сигнатури Р і Т зубців ЕКГ, конфігурація яких є досить чутливою до порушень управління і тому вони становлять найбільший інтерес для

медичних досліджень. Оскільки площа сигнатури відповідає потужності підмножини U_d динамічних станів QRS - комплексу кардіоциклу, то характер її зміни з часом, тобто пакет сигнатур (див. рис. 1,б), графічно відображає особливості перебудови динаміки серцевого ритму (синхронізація чи десинхронізація процесів управління кардіоритмом, характер адаптивних процесів, приховані динамічні порушення управління та інші).

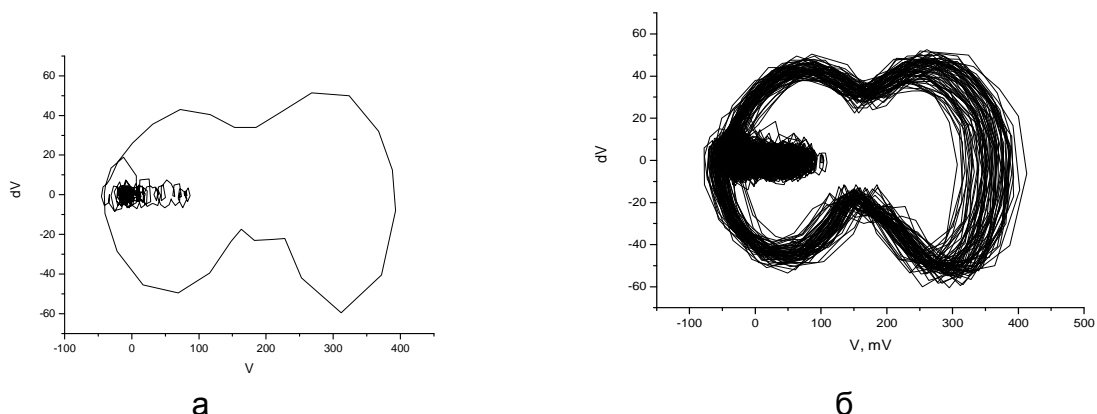


Рисунок 1 – Сигнатури ЕКГ у динамічному просторі (а) і пакет сигнатур ЕКГ (б)

Новими характеристичними ознаками пакета сигнатур ЕКГ є такі: а) ступінь розмиття (ширина) пакета, яка визначає його ентропію; б) однорідність щільності фазових траєкторій в пакеті сигнатур, яка вказує на плавність перехідних процесів; в) неоднорідність щільності траєкторій в пакеті сигнатур, яка вказує на наявність квазістійких граничних кардіоциклів – атракторів; г) діагностично значуща фаза кардіоциклу, наприклад фаза початку розбігання фазових траєкторій в пакеті сигнатур, яка вказує на появу локальної нестабільності. Аналіз пакета сигнатур дозволяє виявити системні ознаки динаміки управління кардіоциклами. Так, за характером зміни щільності конфігурацій в пакеті сигнатур з часом всі отримані при дослідженні операторів пакети сигнатур можна умовно розділити на чотири типи: перший – лабільний, що характеризується пластичним переходом від одного циклу до іншого; другий – лабільно-інертний, коли пакет сигнатур має один – три стійкі граничні цикли (атрактори); третій – нестійкий, в якого розмиті границі сукупності конфігурацій і відсутні атрактори; четвертий – квазідискретний, в якому перехід від одного атрактора до іншого відбувається стрибкоподібно. Отже, у пакетах сигнатур відображаються особливості динаміки регуляторних механізмів, що, як виявилось, мають певний ступінь інертності й пластичності. Вони є важливими доповненнями до дослідження ФС людини.

Для виявлення впливу зовнішніх чинників на ФС оператора нами запропоновано енергетичні сигнатури кардіоциклу, площа яких є підмножиною U_e енергетичних станів. Цифрове диференціювання залежності dV/dt дозволяє побудувати на енергетичній площині $\{d^2V/dt^2, dV/dt\}$ сигнатуру $dV/dt - d^2V/dt^2$ (див. рис. 2,а). Її характеристичні ознаки – кількість і площа петлеподібних ділянок, яка є потужністю підмножини U_e енергетичних станів складових QRS - комплексу кардіоциклу. В енергетичних сигнатурах краще виявляються більш високочастотні складові кардіоциклу. За їх допомогою можна виявити й кількісно оцінити індивідуальні енергетичні особливості кардіоциклу даної людини.

Характер зміни з часом підмножини енергетичних станів QRS-комплексу послідовності циклів добре видно на пакеті сигнатур (рис.2,б), який формується залежностями $F(t) = d^2V/dt^2$ і dV/dt на площині $\{d^2V/dt^2, dV/dt\}$. За їх допомогою можна виявити й кількісно оцінити індивідуальні енергетичні особливості різних фаз кардіоциклу даної людини, які уточнюють системний аналіз сигнатур ЕКГ $V(t) - dV(t)/dt$ та ідентифікацію ФС оператора.

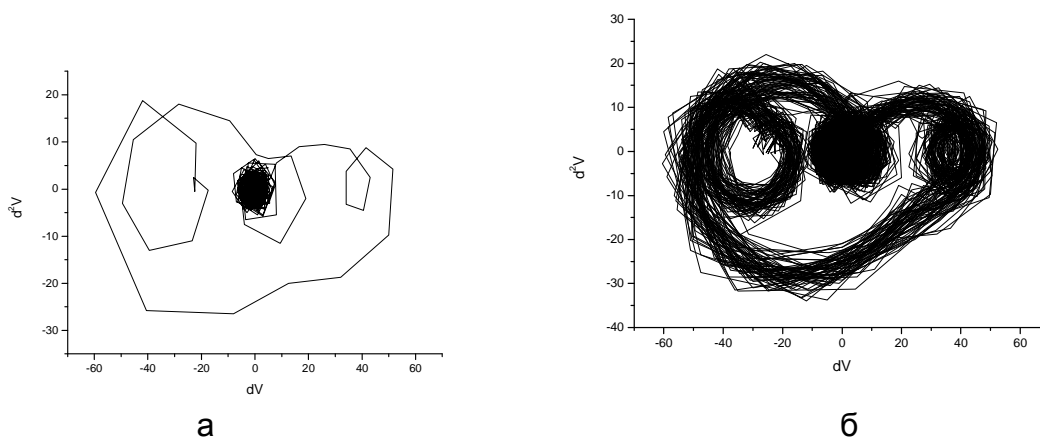


Рисунок 2 – Сигнатури енергетичних станів (а) серця і пакет енергетичних сигнатур (б)

Отже, перетворення ЕКГ у пакети динамічних й енергетичних сигнатур надає якісно нові можливості для ідентифікації та дослідження впливу зовнішніх подразників на його ФС (ступінь втоми тощо). Конфігурація цих сигнатур інтегративно відображає динамічні й енергетичні особливості кардіоциклу, а пакети сигнатур – характер його зміни з часом, тобто особливості управління кардіоритмом. Аналіз і систематизація пакетів динамічних та енергетичних сигнатур ЕКГ оператора дозволяє встановити типові (еталонні) для даного оператора пакети, порівняння з якими допомагає швидко ідентифікувати той чи інший стан оператора, що надає можливість прогнозування його наступного стану. Слід звернути увагу на те, що всі класичні діагностичні показники ЕКГ (форми, висоти зубців P, Q, R, S, T й інтервалів між ними та інші), які отримують із залежностей $V(t)$, уточнюються за залежностями $dV(t)/dt$ і $F(t) = d^2V(t)/dt^2(t)$, і доповнюють вказаними вище характеристичними ознаками й інтегративними показниками.

Обговорення результатів. Висновки

З одного боку, сигнатури ЕКГ є послідовністю дугоподібних ділянок і відрізняються лише їх кількістю, довжиною й кривизною, а значить, описуються однаковими характеристичними ознаками. З іншого боку, оскільки площа сигнатури є потужністю підмножини U_n динамічних (енергетичних) станів, то конфігурація сигнатур визначається характером взаємодії цих станів. Зміна площі під дією внутрішніх чи зовнішніх чинників, а також операції над ними є новими підмножинами U_n . Тому сигнатури характеристик відображають суперпозицію різноманітних динамічних процесів, завуальованих випадковими збуреннями, для аналізу і оцінювання яких можна використати інтегративні показники W_1, W_2, W_3 , які визначаються через операцію R відношення між двома підмножинами станів. Ці

показники під різними кутами зору дозволяють кількісно оцінити системні зміни ФС людини.

Слід зауважити, що різні за природою сигнатури інших характеристик ФС оператора (ЕЕГ, ВАХ БАТШ та інші) мають спільну область існування в динамічному (енергетичному) просторі, описуються універсальними характеристичними ознаками й інтегративними показниками. Отже, сигнатурний аналіз результатів комплексного дослідження ФС оператора сприяє однозначності й узгодженості результатів їх системного аналізу.

Таким чином, шляхом перетворення різних за природою характеристик системних об'єктів (ФС операторів, сенсорів, приладів та інших об'єктів) у сигнатури відповідного простору можна забезпечити не тільки виявлення індивідуальних особливостей, але й їх аналіз і відслідковування характеру зміни з часом. Сигнатурний аналіз надає якісно нові можливості для систематизації результатів дослідження, формування адекватних проблемно-орієнтованих моделей, розроблення нових інтегративних показників і критеріїв оцінювання ФС людини-оператора. На цій основі можна розробити ефективні методики для таких процесів:

- допуску оператора до роботи в екстремальних умовах;
- визначення «ціни діяльності» оператора;
- прогнозування психофізіологічної надійності людини в екстремальній ситуації.

Список літератури

1. Mygal G. Functional state of an operator. System approach./ G.Mygal // NATO – work group «Operator functional state and impaired performance in complex work environments», Il Ciocco, Italy, 2002.
2. Баевский Р.М. Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии / Р.М.Баевский. - М.: Медицина,1979. – 256 с.
3. Мигаль Г.В. Методы контроля функционального состояния операторов / Г.В.Мигаль, О.Ф.Протасенко. - Х: Харьк. нац. академия городского хозяйства. - Вып. 72. – К., - 2006. - С. 313-318.
4. Мигаль Г.В. Залежність психофізіологічного стану людини від стресових факторів життєдіяльності / Г.В.Мигаль, О.Ф.Протасенко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – Вып. 36. – Х., 2007. - С. 32-36.
5. Komar V., Gektin A., Nalivaiko D., Klimenko I., Migal V., Panchuk O., Rybka A. Characterization of CdZnTe crystals grown by HPB method // Nuclear Instruments and Methods in Phys. Research. – 2001. – V.458, №1-2. – P.113-122.
6. But A.V., Mygal V.P., Phomin A.S. CdZnTe Solid Solution Photocurrent Spectra in Parametric Form and their Discrete Wavelet Decomposition // Semiconductors. – 2009. – Vol. 43, №5. – P. 608-612.
7. Мигаль В.П. Фотоэлектрические сигнатуры кристаллов CdZnTe / А.В.Бут, В.П.Мигаль, А.С.Фомин // Физика и техника полупроводников. – 2009. -Т.43, №9. - С. 1257-1260.
8. Мигаль В.П. Применение параметрических и вейвлет сигнатур для диагностики сенсоров / А.В.Бут, И.А.Клименко, В.П.Мигаль, Г.В.Мигаль // – РЭКС, Х.: ХАИ.- 2009.
9. Bergman S., Ihmels J., Barkai N. // Pys.Rev. E, 67,031902, 2003.

10. Мигаль В.П. Неаддитивная фотопроводимость и индуцированные состояния кристаллов селенида цинка / В.П.Мигаль // Физика и техника полупроводников. – 2001. Т.35, №10. – С. 1188 – 1191.

11. Mygal V.P. Evolution of the time and spatial photoresponse instabilities of the sensors based on CdZnTe.crystals / A.V.But, V.P.Mygal, A.S.Phomin // Functional Materials. – 2009. – Vol. 16, №1. – P. 5-10.

12. Бибилова Л.А. Системная медицина - путь от проблем к решению / Л.А.Бибилова, С.В.Ярилов // СпбГУ, НИИ Химии, 2000. - 154 с.

13. Мигаль В.П. Спосіб оцінювання електрокардіографічних даних для діагностичних цілей / В.П.Мигаль, Г.В.Мигаль // Пат. №77203, МПК 92006 А61 В5/0402. Заявл.17.10.2005; Опубл. 15.11.2006; Бюл. №11.

14. Мигаль В.П. Электроиндуцированные локальные особенности спектров фототока кристаллов CdZnTe / А.В.Бут, В.П.Мигаль, А.С.Фомин // Письма в ЖТФ.

15. Коломиец Б.Т. Динамические ВАХ тела человека / Письма в ЖТФ. – 1979.– Т.5, № 19. - С. 44-51.

Рецензент: А.Т. Ашеро́в, профессор, завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних технологій Української інженерно-педагогічної академії (м. Харків).

Поступила в редакцию 07.12.09

Сигнатуры ЕКГ и функциональное состояние человека-оператора

Для исследования и идентификации функционального состояния оператора предложены динамические и энергетические сигнатуры ЭКГ, а также универсальные характеристические признаки и интегративные показатели сигнатур, позволяющие выявлять новую информацию, которая скрыта в динамике изменения функционального состояния оператора. Показано, что конфигурация сигнатуры и характер ее изменения в пакете отображают особенности влияния внутренних и внешних факторов раздражителей на состояние оператора.

Ключевые слова: человек–оператор, ЕКГ, сигнатурный анализ, функциональное состояние, кардицикл, интегративные показатели, сенсоры.

Electrocardiogram's signature and operator's functional state

For the functional operator state research and authentication the dynamic and power signatures of ECG, and also universal characteristic signs and integrative indexes of signatures which allows to expose a new information, that is hidden in the dynamics of the functional operator state change are offered. It is shown, that signatures configuration and behaviour in a packet represent the features of the internal and external irritants influencing on the operator state.

Keywords: human-operator, ECG, signature analisys, functional state, cardiocircle, integrative indexes, sensors.