

**Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя**

Дедів Леонід Євгенович

УДК 519.218:612.17

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОКАРДІОСИГНАЛУ ДЛЯ
ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ СИСТЕМ
ГОЛТЕРІВСЬКОГО МОНІТОРИНГУ**

01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи

**Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Тернопіль – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник

доктор фізико-математичних наук, професор
Драган Ярослав Петрович,
Національний університет „Львівська політехніка”,
професор кафедри програмного забезпечення
автоматизованих систем, м.Львів

Офіційні опоненти

доктор технічних наук, професор
Овсяк Володимир Казимирович,
Українська академія друкарства, професор кафедри
автоматизації та комп'ютерних технологій, м.Львів

доктор технічних наук, доцент
Лупенко Сергій Анатолійович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя, завідувач кафедри комп'ютерних систем
та мереж, м.Тернопіль

Захист відбудеться ”__” _____ 2011 р. о ”__” год. ”__” хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради **К 58.052.01** в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79).

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56

Автореферат розісланий ”__” серпня 2011 р.

*Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради К 58.052.01*

Шелестовський Б.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Згідно зі статистичними даними Всесвітньої організації охорони здоров'я людини за 2010 р., від серцево-судинних захворювань (ССЗ) померло 17,5 млн. людей. Це пов'язано із впливом на стан серцево-судинної системи людини внутрішніх (стрес, розумове перенапруження тощо) та зовнішніх (несприятлива екологія, суцільна комп'ютеризація, фізичне навантаження) факторів. Тому, важливим завданням сучасної кардіології в Україні та у світі є своєчасне виявлення і запобігання серцево-судинних патологій.

Діагностування стану серцево-судинної системи за електрокардіосигналом (ЕКС) проводять з використанням голтерівських систем моніторингу (зокрема, Edilog Excel (Oxford, Англія), MT-100 (Schiller, Швейцарія), Mars PC (GE, США), Кардіотехніка (ИНКАРТ, Росія, Санкт-Петербург), Ритм (НТО "БЭТА", Україна, Кіровоград), Cardio Sens (НТЦ «ХАІ-Медика», Україна, Харків)).

Відомі математичні моделі та розроблені на їх основі методи аналізу характеристик електрокардіосигналів, використані у цих системах, не враховують того, що функціонування серцево-судинної системи впродовж доби є накладанням серцевого ритму і впливу на нього добової зміни стану організму і, тим самим, не забезпечують точності діагностування. Діагностична цінність голтерівського моніторингу (ГМ) залежить від наявності системи моніторингу, що базується на адекватній математичній моделі, яка враховує добову структуру ЕКС, тобто добовий хід зміни серцевого ритму і дає змогу автоматизовано проводити процес діагностування.

Тому актуальною науковою задачею є удосконалення математичної моделі електрокардіосигналу та розроблення на її основі методу його аналізу для підвищення інформативності автоматизованих систем голтерівського моніторингу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Тема дисертаційної роботи пов'язана із загальним напрямком роботи кафедри біотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, зокрема із науковою темою ВК 20-06, „Дослідження методів та засобів виявлення евентуальних, циклічних та ритмічних біосигналів”, номер державної реєстрації № 0106U002062, 2006-2007 р.р. Вклад дисертанта полягає у розробленні програмного забезпечення та статистичного опрацювання ритмічних біосигналів і проведенні серії статистичних експериментів.

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є удосконалення математичної моделі електрокардіосигналу та розроблення методу його аналізу, сформованого базуючись на цій моделі, для підвищення інформативності систем голтерівського моніторингу. Досягнення мети вимагає розв'язання таких задач:

1. Провести аналіз відомих математичних моделей електрокардіосигналів у системах голтерівського моніторингу та методів опрацювання їх для обґрунтування напрямку наукового дослідження.
2. Удосконалити математичну модель електрокардіосигналу, щоб врахувати у її структурі подвійну ритміку – ритміку серцево-судинної системи та добовий хід станів системи як мінливість довготривалого електрокардіосигналу, для розв'язання задач оперативного та достовірного виявлення змін у

функціонуванні серцево-судинної системи.

3. Обґрунтувати метод статистичного опрацювання та комп'ютерного імітаційного моделювання електрокардіосигналу на основі цієї математичної моделі для підвищення інформативності систем голтерівського моніторингу.
4. Обґрунтувати застосовність нових інформативних ознак електрокардіосигналу в системах голтерівського моніторингу і спосіб обчислення оцінки достовірності отриманих результатів.
5. Розробити програмне забезпечення для опрацювання електрокардіосигналів для верифікації удосконаленої математичної моделі та статистичного методу її опрацювання.

Об'єкт дослідження: процес моделювання та опрацювання електрокардіосигналу.

Предмет дослідження: математична модель електрокардіосигналу у вигляді кускового періодично корельованого випадкового процесу як варіант врахування подвійного ритму та її властивості і можливості для підвищення інформативності систем голтерівського моніторингу.

Методи дослідження побудовано на базі енергетичної теорії стохастичних сигналів (ЕТСС), зокрема подання кусково періодично корельованого випадкового процесу для удосконалення математичної структури електрокардіосигналу і оцінювання його параметрів та статистичної теорії вибору рішень при верифікації математичної моделі електрокардіосигналу у системах голтерівського моніторингу. Для програмної реалізації алгоритмів опрацювання використано пакет прикладних програм MATLAB 2008.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше на основі аналізу механізму формування реєстрограми електрокардіосигналу у системах голтерівського моніторингу обґрунтовано математичну модель електрокардіосигналу у вигляді кусково періодично корельованого випадкового процесу як спеціальної версії біперіодно корельованого з різко різномасштабними періодами, що уможливило використання статистики періодично корельованих випадкових процесів для різних фаз електрокардіосигналу.

2. Вперше застосовано концепцію гетеродина для опису моделі взаємодії гармонічних складових двоперіодно корельованого випадкового процесу у термінах биттів, що дає змогу обґрунтувати зміну періоду електрокардіосигналу під впливом циркадного ритму.

3. Вперше застосовано нові в області діагностики стану серцево-судинної системи інформативні ознаки електрокардіосигналу – спектральні компоненти, які відповідають функціональному станові серцево-судинної системи.

4. Розроблено алгоритм комп'ютерного імітаційного моделювання електрокардіосигналу у системах голтерівського моніторингу для верифікації побудованої математичної моделі, що підтвердило узгодження результатів комп'ютерного експерименту з натурними даними.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що на базі розробленої математичної моделі електрокардіосигналу удосконалено відомі методи його аналізу, які дають змогу підвищити достовірність та розширити можливості автоматизованих систем голтерівського моніторингу шляхом впровадження в

область кардіології нового класу достовірних інформативно-інваріантних ознак, що ними є спектральні компоненти. Побудована комп'ютерна імітаційна модель електрокардіосигналу придатна для тестування алгоритмів опрацювання даних, отриманих у лікувальних установах.

Результати дисертаційного дослідження використанні в навчальному процесі на кафедрі нормальної фізіології Тернопільського державного медичного університету ім. І.Я.Горбачевського.

Особистий внесок. Основні результати, які становлять суть дисертаційної роботи, отримані дисертантом самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертанту належить:

- у роботі [1,9] – обґрунтовано математичну модель добового електрокардіосигналу у вигляді кусково-періодично корельованого випадкового процесу;
- у роботі [2] – розроблено спосіб візуалізації добового електрокардіосигналу шляхом розкладу його на однакові по часовій тривалості куски;
- у роботах [3,8] – застосування синфазного методу аналізу для визначення інформативних ознак добового електрокардіосигналу у системах голтерівського моніторингу;
- у роботах [4,7] – комп'ютерна імітаційна модель електрокардіосигналу у вигляді суми синусоїд з експонентційним затуханням на характерних часових інтервалах;
- у роботі [5] – комп'ютерна імітаційна модель електрокардіосигналу на основі періодично корельованої випадкової послідовності;
- у роботі [6] – комп'ютерна імітаційна модель електрокардіосигналу на основі кускової періодично корельованої випадкової послідовності;
- у роботах [10,11] – застосування алгебри алгоритмів для розроблення алгоритму синфазного опрацювання електрокардіосигналу у системах голтерівського моніторингу.

Апробація результатів дисертації. Викладені в дисертаційній роботі результати доповідалися і обговорювалися на дванадцятій, тринадцятій, чотирнадцятій науково-технічних конференціях Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя м. Тернопіль, 2009-2010 р.р.; міжнародній конференції „Сучасні напрямки теоретичних і прикладних досліджень '2010” (Одеса), 2010 р.; міжнародній конференції „Перспективні інновації в науці, виробництві і транспорті '2010” (Одеса), 2010 р.; щорічних наукових семінарах кафедри біотехнічних систем Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

В цілому роботу апробовано у Національному технічному університеті імені Івана Пулюя (м. Тернопіль), Національному університеті імені Юрія Федьковича (м. Чернівці) та Національному університеті „Львівська політехніка” (м. Львів).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 11 наукових праць, 6 із них – статті у наукових фахових виданнях [1-6], 5 тез наукових конференцій [7-11]. Праця [6] опублікована без співавторів.

Структура та обсяг. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновку, викладених на 96 сторінці, списку використаних джерел з 107

назв на 11 сторінках, додатків на 9 сторінках. Загальний обсяг роботи становить 117 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі шляхом аналізу відомих математичних моделей обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, показано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, розкрито питання апробації результатів дисертації на конференціях і семінарах та висвітлення їх у друкованих працях.

У першому розділі проведено порівняльний аналіз та класифікацію відомих математичних моделей ЕКС, які використовуються при розробленні методів опрацювання цих сигналів для задач автоматизованої діагностики функціонального стану серця людини у системах голтерівського моніторингу.

З огляду відомих моделей впливає, що існує два підходи до побудови математичних моделей та методів аналізу ЕКС – детермінований та стохастичний. Хоча детерміновані моделі ЕКС у вигляді періодичних функцій, які як правило є розв'язками рівнянь математичної фізики, описують частотний склад та інтенсивність гармонічних складових сигналу. Ймовірнісний опис коливань за допомогою стаціонарних процесів дає розподіл середньої потужності по гармоніках (частотний спектр), але не має засобів, щоб описати періодичність коливань у часі. Досконаліший опис стохастичних коливань з урахуванням часової періодичності кореляційних зв'язків (і миттєвої потужності сигналу в часі) дає модель у вигляді періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП) як адекватне поєднання випадковості та періодичності. Використання такої моделі для опису стохастичних коливань обґрунтовано у працях К.Войчишина, Я.Драгана, І.Яворського, а для **аналізу спеціально** біомедичних процесів у працях Б.Яворського, Є.Яворської, Г.Шадріної, Л.Чорної, Г.Осухівської, М.Хвостівського. Застосування цієї моделі до деяких задач дослідження, зокрема серцево-судинної системи, зроблено у працях Л.Чорної, Г.Осухівської, Є.Яворської. Така модель описує ритм тільки одного періоду ЕКС, а голтерівський моніторинг як добовий має враховувати крім того ще зміну серцевого ритму із добовим ходом, тому адекватною моделлю такого сигналу є біперіодично корельований випадковий процес (біПКВП) як модель двоперіодної ритміки.

Враховуючи специфіку поставлених задач, відомі підходи до їх розв'язання та особливості досліджуваного сигналу, сформульовано вимоги до удосконаленої математичної моделі ЕКС, яка враховує двоперіодний ритм, для систем голтерівського моніторингу.

У другому розділі проаналізовано характеристики електрокардіосигналу з позицій детермінованого та стохастичного (методами теорії стаціонарних випадкових процесів) підходів. Враховуючи результати аналізу та структуру електрокардіосигналу у системах голтерівського моніторингу обґрунтовано вибір його математичної моделі у вигляді біперіодично корельованого випадкового процесу.

При тривалому відслідковуванні функціонування серцево-судинної системи типу голтерівського моніторингу має бути прийнятий до уваги добовий хід змін усього організму, тому природньою моделлю, адекватною ситуації – модулюванні ритмозадачного пульсатора циркадним ритмом, буде біПКВП у вигляді:

$$\xi(t) = \sum_{k,n \in Z} e^{it \left(k \frac{2\pi}{T_1} + n \frac{2\pi}{T_2} \right)} \zeta_{kn}(t), \quad t \in R, \quad (1)$$

де T_1 та T_2 – періоди ЕКС та добового ходу;

$\zeta(t) = [\zeta_{kn}(t)]_{k,n \in Z}$ – матричний нескінченновимірний стаціонарний випадковий процес, а Z – множина цілих чисел.

Коли взяти до уваги надто вже значну (в даному разі – це секунди і десятки годин) різномасштабність періодів, тобто, що $T_1 \gg T_2$, то можна обґрунтувати розбиття добової тривалості $T_2 = \coprod_{n=1, N} A_n$ на сегменти тривалостей A_n (рис.1), на яких

ЕКС буде ПКВП з періодом корельованості T_n , $n = \overline{1, N}$, де N – кількість таких сегментів. Тоді модель ЕКС набуде вигляду:

$$\xi(t) = \sum_{k \in Z, n=1, N} \chi_{A_n}(t) e^{it \left(k \frac{2\pi}{T_1} + n \frac{2\pi}{T_2} \right)} \zeta_{kn}(t) = \sum_{n=1, N} \chi_{A_n}(t) \varsigma_n(t), \quad (2)$$

де $\varsigma_n(t) = \sum_{k \in Z} e^{itk \frac{2\pi}{T_n}} \zeta_{kn}(t)$ – n -ий ПКВП періоду T_n на сегменті $A_n : t \in A_n$, $\chi_{A_n}(t)$ – індикаторна функція відрізка A_n , і цим обґрунтовується коректність застосування для опрацювання ЕКС на сегментах A_n або контрольних вибірок із ЕКС на них методів уже апробованої статистики ПКВП.

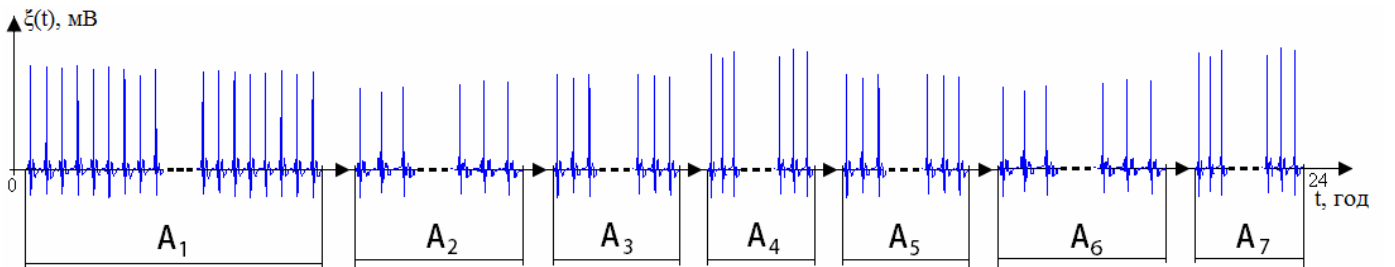


Рис. 1. Структура добового ЕКС

Враховуючи те, що на кожному n -ому сегменті A_n ЕКС є ПКВП, тому добовий ЕКС подано у вигляді кускового ПКВП через стаціонарні компоненти:

$$\xi(t) = \sum_{n=1, N} \chi_{A_n}(t) \sum_{k \in Z} \zeta_{kn}(t) e^{-ik \frac{2\pi}{T_n}}, t \in R, \quad (3)$$

де $\zeta_{kn}(t)$ - стаціонарні компоненти ЕКС в межах n -ого сегменту.

Зображення (3) у вигляді кускового ПКВП є адекватним добовому ЕКС, що дає змогу врахувати у своїй структурі поєднання серцевого ритму із добовим ходом, та застосувати до нього відомі методи статистичного опрацювання ПКВП (синфазний та компонентний) з метою отримання статистичних оцінок. Ці оцінки використано як показники стану серцево-судинної системи людини впродовж доби.

У третьому розділі на базі обґрунтованої математичної моделі ЕКС у вигляді кускового ПКВП отримано вирази для числення синфазним методом статистичних оцінок його характеристик, які дали змогу підвищити інформативність систем ГМ шляхом впровадження в область кардіології нового класу інформативних ознак.

Синфазний метод аналізу, базується на усередненні відліків через період корельованості, і, на відміну від компонентного, є швидшим при опрацюванні даних.

При опрацюванні ЕКС синфазним методом використано відомий факт, що відліки значень ЕКС n -ого сегменту через період корельованості T при різному виборі початку відліку (початкової фази) $t \in [0, T)$ утворюють стаціонарну ергодичну векторну випадкову послідовність $\{\xi(t), t \in [0, T)\}$, де $\xi(t) \overset{\Delta}{=} \{\xi(t + kT), k \in Z\}$. На основі даного методу характеристики ЕКС (коваріаційні компоненти $\hat{b}_{\xi}(t, u)$), які дають змогу оцінити часову мінливість сигналу на n -ому сегменті, обчислено за виразом:

$$\hat{b}_{\xi_n}(t, u) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \overset{0}{\xi}_n(t + u + kT) \overset{0}{\xi}_n(t + kT), \quad (4)$$

де $\overset{0}{\xi}_n(t) = \xi_n(t) - m_{\xi_n}(t)$ - центрований ЕКС в межах n -ого сегменту.

Кореляційний аналіз ЕКС n -ого сегменту, окрім обчислення оцінок коваріаційних компонент $\hat{b}_{\xi_n}(t, u)$, ставить також задачу знаходження оцінок спектральних компонент $\hat{B}_{kn}(u)$. Оцінка спектральних компонент є статистикою:

$$\hat{B}_{kn}(u) = \frac{1}{N} \sum_{k \in Z} \hat{b}_{\xi_n}(t, u) \exp\left(-ik \frac{2\pi}{T_n} t\right). \quad (5)$$

Використовуючи алгебру алгоритмів Овсяка В.К., яка, на відміну від вербального та блок-схемного описів, забезпечує точний опис, мінімізацію за кількістю дій (унітермів), розроблено формулу алгоритму синфазного опрацювання добового ЕКС:

$$\begin{array}{l}
 \xi(i) \\
 ; \\
 NT \\
 ; \\
 \mathcal{Q}(m \leq M) \\
 \left| \begin{array}{l}
 \mathcal{Q}(n \leq NT) \\
 \hline
 \mathcal{Q}(u \leq Nu) ; \\
 \hline
 \mathcal{Q}(kl \leq (N_k - 1)) ; \quad c_{(n \leq NT)} ; \quad (u \leq Nu) - ? \\
 \hline
 \left(\begin{array}{l}
 b_m(n, u) = \quad ; c_{(u \leq Nu)} ; (kl \leq (N_k - 1)) - ? \\
 = b_m(n, u) + \\
 + \xi_m(n + kl * NT + T_m) * \\
 * \xi_m(n + (kl + u) * NT + T_m) \\
 ; \\
 c_{(kl \leq (N_k - 1))}
 \end{array} \right. \\
 \hline
 ; \\
 \text{mean}(|B_k(m, n)| / N_u) \\
 ; \\
 (m \leq M) - ?
 \end{array} \right. \left| \begin{array}{l}
 b_m(n, u) = b_m(n, u) / N_k ; (n \leq NT) - ? \\
 ; \\
 \mathcal{Q}(k \leq K) \\
 \hline
 \mathcal{Q}(n \leq NT) ; |B_k(m, n)| / N_u ; (k \leq K) - ? \\
 \hline
 \mathcal{Q}(u \leq Nu) ; \quad c_{(k \leq K)} ; \quad (n \leq NT) - ? \\
 \hline
 B_{k+1}(m, n) = B_k(n) + ; c_{(n \leq NT)} ; (u \leq Nu) - ? \\
 + b_m(n, u) * \\
 * \exp(-j2\pi k u / NT) \\
 ; \\
 c_{(u \leq Nu)}
 \end{array} \right. \quad (6)
 \end{array}$$

де $u \in \overline{u_0; u_1; u_2; \dots; Nu}$, $i \in \overline{1; 2; 3; \dots; N}$, $kl \in \overline{0; 1; 2; \dots; N_k - 1}$,

$k \in \overline{0; 1; 2; \dots; K}$, $n \in \overline{1; 2; 3; \dots; NT}$, $m \in \overline{1; 2; 3; \dots; M}$, M – кількість сегментів ЕКС; T_m – тривалість m -ого сегменту; K – кількість компонент; N_k – кількість періодів; NT – дискретна довжина періоду; N_u – максимальна довжина зсуву; $\xi(i)$ – реалізація добового запису ЕКС.

Формула алгоритму комп'ютерного опрацювання добового ЕКС (6) дала змогу розробити програмне забезпечення для оцінювання його характеристики з метою виявлення нових в області кардіології інформативних ознак на основі математичної моделі у вигляді кусково періодично корельованої випадкової послідовності.

У четвертому розділі на базі обґрунтованої математичної моделі добового ЕКС проведено експериментальні дослідження для отримання його спектральних характеристик синфазним методом. Розроблено метод комп'ютерного імітаційного моделювання добового ЕКС. Результати порівняння ймовірнісних характеристик імітаційної моделі і натурального ЕКС підтвердили коректність імітаційного моделювання. Здійснено перевірку розробленої у розділі 2 математичної моделі ЕКС на відповідність експериментальному сигналові.

Враховуючи той факт, що процес візуалізації усього добового ЕКС на дисплеї не є можливим, використано посегментний спосіб візуалізації, який базується на розбитті ЕКС на короткі часові інтервали із подальшим їх паралельним розташуванням один за одним (рис.2), що дає змогу відстеження змін ЕКС від сегмента до сегмента.

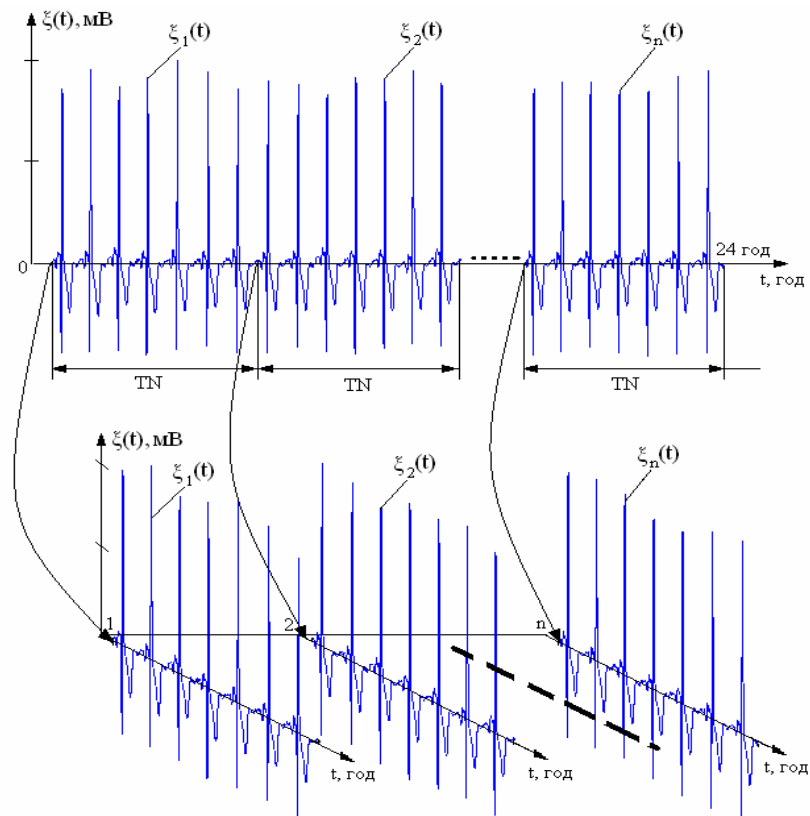


Рис.2. Посегментний спосіб зображення добового ЕКС для систем ГМ

Використовуючи названий спосіб візуалізації (рис.2), експериментально зареєстрований добовий ЕКС системою ГМ “CardioSans” зображено на рис.3,4.

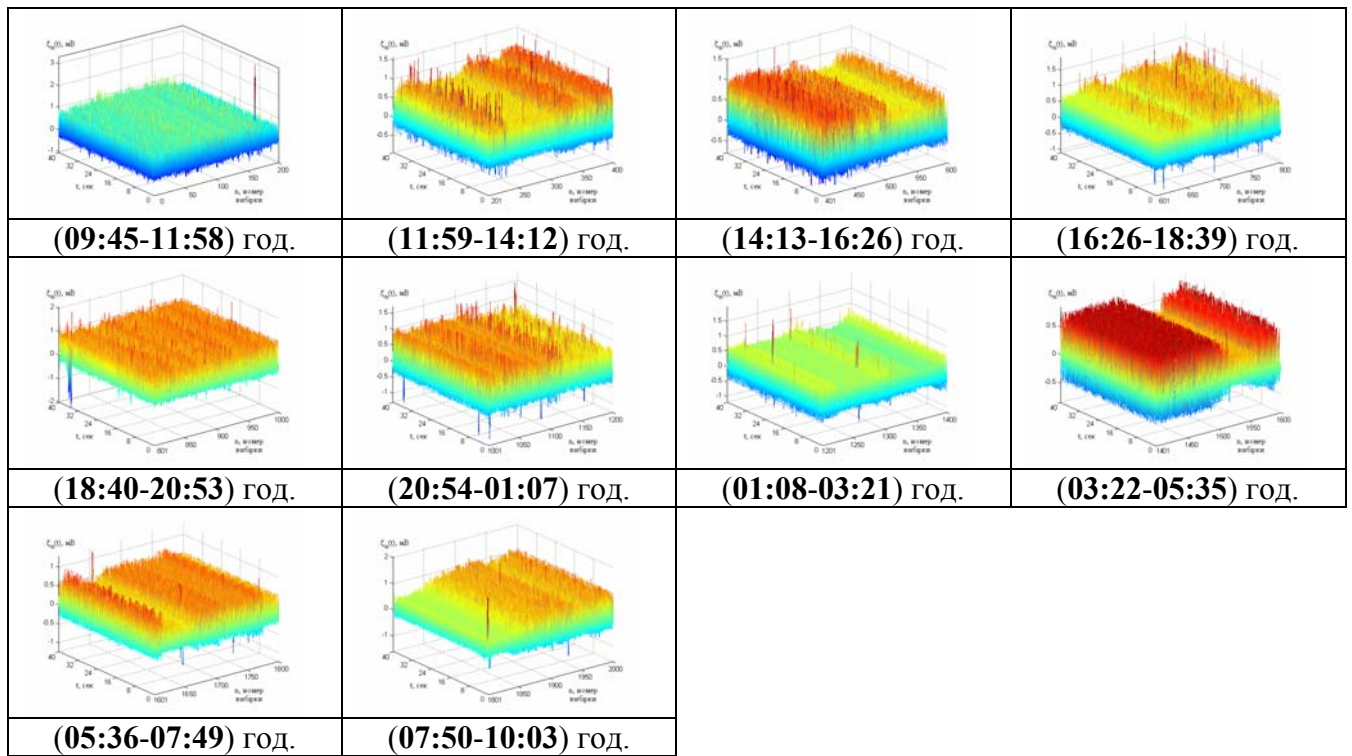


Рис.3. Реалізації сформованих вибірок із добового ЕКС (1-ша доба)
(вісь абсцис - час, с, вісь ординат – номер вибірки, вісь аплікату - амплітуда, мВ)

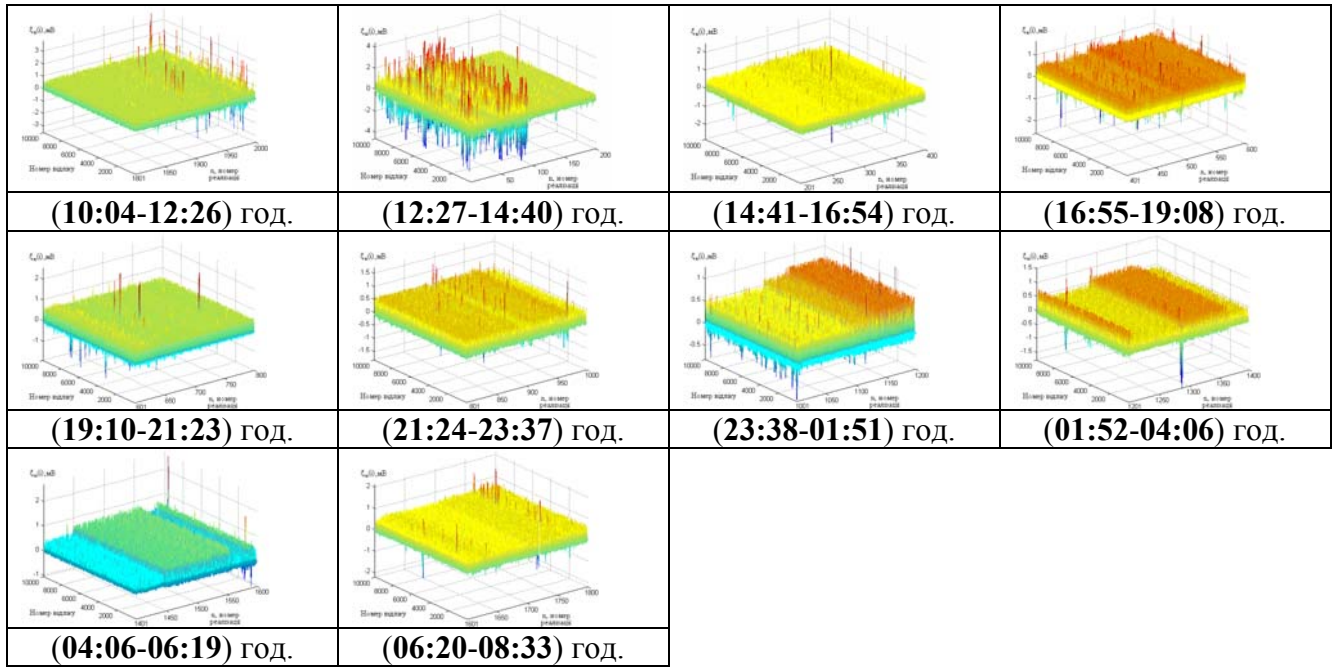


Рис.4. Реалізації сформованих вибірок із добового ЕКС (2-га доба)
(вісь абсцис - час, с, вісь ординат – номер вибірки, вісь аплікату - амплітуда, мВ)

Шляхом візуального порівняння отриманих реалізацій сформованих вибірок із добового ЕКС (рис.3,4) встановлено, що таке подання добового ЕКС дає змогу відстежити сегменти ЕКС та їх часові границі з метою подальшого опрацювання.

Оскільки впродовж дня організм кожної людини функціонує по різному, при цьому не зберігаючи однорідність діяльності (велика варіація часових інтервалів фізичної, розумової, психологічної праці та ін.), чого не скажеш про сон (збереження структури ЕКС), тому для опрацювання добового ЕКС використано лише сегменти ночі.

Враховуючи те, що впродовж одного сегменту умови формування ЕКС суттєво не змінюються, то за критерієм Слуцького ЕКС в межах сегменту є ергодичним процесом. Це дає можливість за достатньо короткою вибіркою судити про вибраний сегмент.

Використовуючи алгоритм опрацювання вибраних сегментів добового ЕКС синфазним методом (6), отримано спектральні компоненти ЕКС для кожного сегменту.

Оцінку математичного сподівання M_k реалізацій спектральних компонент $\hat{B}_{kn}(u)$, обчислено за виразом:

$$M_k \{ \hat{B}_{kn}(u) \} = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} \hat{B}_{kn}(u), \quad u = \overline{1, N_u}, \quad k = \overline{1, N_k}, \quad (7)$$

де k - номер спектральної компоненти, u - зсув, n - номер вибірки, N_u - кількість зсувів, N_k - кількість компонент.

Реалізації оцінок математичного сподівання для спектральних компонент ЕКС зображено на рис. 5,6.

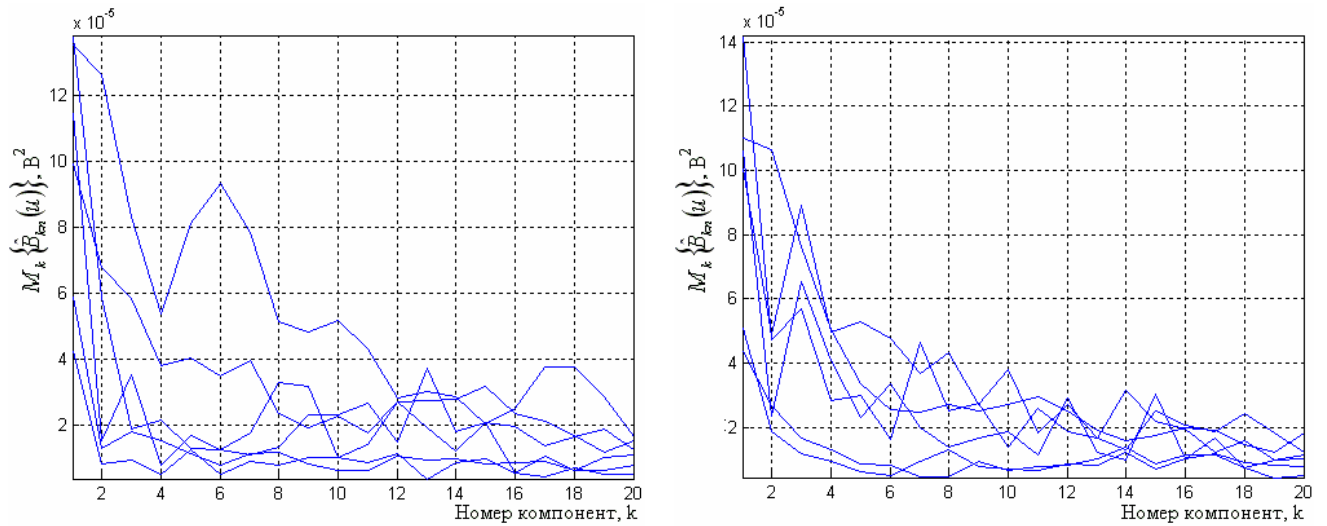


Рис. 5. Оцінки математичного сподівання $M_k \{\hat{B}_{kn}(u)\}$ (доба 1, доба 2)

За статистичну оцінку, яка дасть змогу описати весь ЕКС через сукупність ЕКС окремих сегментів, використано оцінку математичного сподівання:

$$M_u \{M_k \{\hat{B}_{kn}(u)\}\} = \frac{1}{N_k} \sum_{k=1}^{N_k} M_k \{\hat{B}_{kn}(u)\}, \quad u = \overline{1, N_u}, \quad k = \overline{1, N_k}. \quad (8)$$

Реалізації оцінок математичного сподівання всього ЕКС для 2-х діб зображено на рис. 6.

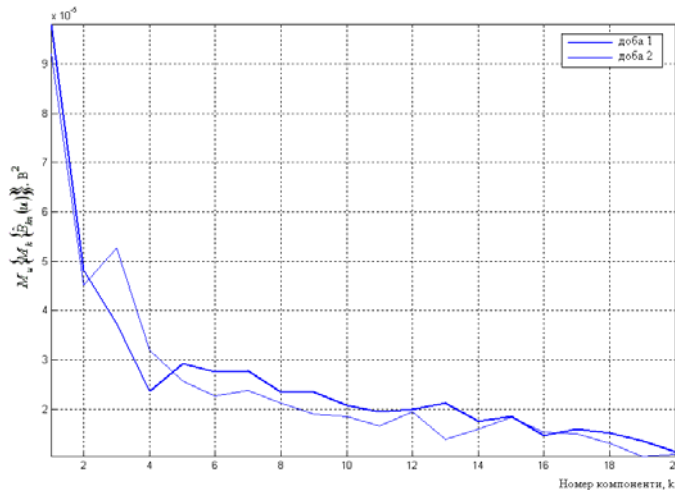


Рис. 6. Оцінки математичного сподівання $M_k \{\hat{B}_{kn}(u)\}$ добового ЕКС

З рисунка видно, що значення максимумів оцінок математичного сподівання для 1-ої та 2-ої доби зосереджені на одних і тих самих частотах, проте амплітудні значення оцінок різняться між собою. Тому ці оцінки є чутливо-кількісними показниками при розрізненні різних станів серцево-судинної системи (норма чи патологія), використання яких як нових інформативних ознак, впроваджених в область кардіології, розширить інформативність систем ГМ.

Для оцінювання достовірності результатів опрацювання сукупності сегментів добового ЕКС використано статистичний критерій Неймана-Пірсона, в основі якого лежить ідеологія розрізнення двох гіпотез: добовий ЕКС стаціонарний чи нестаціонарний.

Достовірність обчислено за формулою:

$$p_d = 1 - \Phi(U - m_1) / \sqrt{D_1}, \quad (9)$$

де m_1 – усереднені значення математичного сподівання ЕКС $M_u \{M_k \{\hat{B}_{kn}(u)\}\}$ як кускового ПКВП;

D_1 – усереднені значення дисперсії оцінок математичних сподівань ЕКС $M_u \{M_k \{\hat{B}_{kn}(u)\}\}$ як кускового ПКВП;

U – поріг розрізнення між стаціонарністю та нестаціонарністю, $U = \sqrt{D_0} \Phi^{-1}(1 - p_f) + m_0$, де m_0 і D_0 – математичне сподівання і дисперсія усередненого значення спектральної густини потужності вибірки сегментів ЕКС як стаціонарної послідовності, p_f – ймовірність помилки.

Середню достовірність оцінювання спектральних компонент ЕКС обчислено згідно з виразом:

$$p_d = \frac{1}{N_p} \sum_{k=1}^{N_p} p_{d_k}, \quad (10)$$

де p_{d_k} – значення достовірності вибірки k -ого сегменту добового ЕКС; N_p – кількість вибірок, $N_p = 6$.

Результати обчислених миттєвих значень достовірностей p_d спектральних компонент кожного сегменту ЕКС при заданих ймовірностях помилки $p_f = (0.001, 0.01, 0.1)$ вказують на те, що оцінки усереднених спектральних компонент ЕКС (рис.6) є інформативними ознаками, за допомогою яких можна з високою достовірністю (0,9785-0,9861) оцінити стан серцево-судинної системи людини впродовж доби (норма чи патологія), що підтвердило адекватність математичної моделі ЕКС у вигляді кусково ПКВП.

Базуючись на математичній моделі ЕКС у вигляді кускового ПКВП вираз для реалізації комп'ютерної імітаційної моделі подано у вигляді:

$$\begin{aligned} \xi(i\Delta t) &= \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M \chi_{D_{skj}}(i\Delta t) \cdot \xi_{x6uля_{skj}}(i\Delta t) = \\ &= \sum_{s=1}^S \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^M \chi_{D_{skj}} \cdot \left((\psi_{A_{skj}} + A_{skj}) \cdot \sin \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot (i\Delta t + \psi_{T_{skj}} + kN_{T_{skj}})}{f_{skj}} \right) \cdot e^{-i\Delta t \cdot K_{skj}} \cdot C_{skj} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

де $\chi_{D_{skj}}(i\Delta t) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\Delta t \in D_{skj} \\ 0, & \text{якщо } i\Delta t \notin D_{skj} \end{cases}$ – матриця $s \times k \times j$ індикаторних функцій,

$D_s = \prod_j D_{skj}$; S - кількість сегментів ЕКС; N - кількість періодів ЕКС; M - кількість хвиль ЕКС протягом одного періоду; A_{skj} - амплітуда skj -ої хвилі; f_{skj} - частоти коливань синусоїд (в даному випадку для півперіоду); K_{skj} - коефіцієнти нахилу skj -ої хвилі; S_{skj} - масштабні коефіцієнти для skj -ої хвилі; $\psi_{A_{skj}}(M(A_{skj}), D(A_{skj}))$ - випадкова величина амплітуди skj -ої хвилі з математичним сподіванням $M\{A\}$ та дисперсією $D\{A\}$, яка є показником відхилення; $\psi_{T_{skj}}(M(T_{skj}), D(T_{skj}))$ - випадкова величина амплітуди skj -ої хвилі з математичним сподіванням $M\{T\}$ та дисперсією $D\{T\}$, яка є показником відхилення.

Використовуючи алгебру алгоритмів розроблено формулу алгоритму імітаційного моделювання ЕКС на базі моделі (11), яка дала змогу розробити програмне забезпечення у середовищі MATLAB для комп'ютерного моделювання реалізації добового ЕКС у стані норми з метою верифікації обґрунтованої математичної моделі.

$$\begin{array}{l}
 \overbrace{(S; N; M; \Psi A(s, k, j), \Psi T(s, k, j), K(s, k, j), C(s, k, j), NT(s, k), f(s, k, j))} \\
 ; \\
 \underbrace{\zeta(s \leq S)} \\
 \quad \underbrace{\zeta(k \leq N)} \\
 \quad \quad \underbrace{\zeta(j \leq M)} \\
 \quad \quad \quad \left| \begin{array}{l}
 \zeta(i) = \zeta(i) + (A(s, k, j) + \Psi A(s, k, j)) * \\
 * \sin(2 * \pi * (i + \Psi T(s, k, j) + k * NT(s, k)) / \\
 / f(s, k, j)) * \exp(-i * K(s, k, j)) * C(s, k, j) \\
 ; \\
 \zeta(j \leq M); \\
 ; \\
 \zeta(s \leq S) \\
 ; \\
 (k \leq N) - ? \\
 ; \\
 \zeta(i) \rightarrow \\
 ; \\
 (s \leq S) - ?
 \end{array} \right|
 \end{array} \quad (12)$$

де $k \in \overbrace{1; 2; 3; \dots; N}$, $s \in \overbrace{1; 2; 3; \dots; S}$, $j \in \overbrace{1; 2; 3; \dots; M}$, $i \in \overbrace{1; 2; 3; \dots; N}$.

Реалізації оцінок математичного сподівання усереднених спектральних компонент зімітованого та натурального ЕКС зображено на рис. 7.

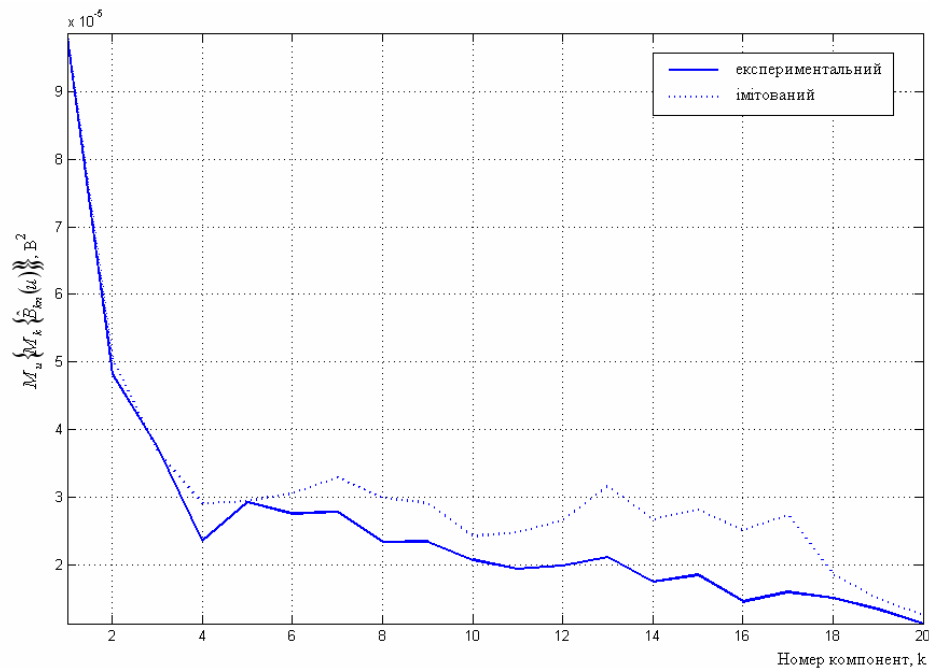


Рис. 7. Оцінки математичних сподівань усереднених спектральних компонент $M_n \{M_k \{\hat{B}_{kn}(u)\}\}$ імітованого та натурального реалізацій ЕКС (норми)

На рис.7 видно, що значення максимумів амплітуд оцінок математичного сподівання усереднених спектральних компонент зімітованого ЕКС локалізуються на тих самих компонентах, що і оцінки натурального сигналу, а максимальне значення модуля різниць достовірностей натурального і імітованого сигналу для норми становить $6.5 \cdot 10^{-6}$ В, що свідчить про високу точність імітаційного відтворення по відношенню до натурального ЕКС. Даний факт є підставою для верифікації математичної моделі та методу опрацювання добового ЕКС.

На основі удосконаленої математичної моделі та методу аналізу ЕКС створено пакет комп'ютерних програм для статистичного опрацювання та комп'ютерного імітаційного моделювання добового ЕКС як складової частини спеціалізованого програмного забезпечення автоматизованих систем ГМ.

У **додатках** наведено тексти програм, розроблені для ПК (ОС Windows 7), акт впровадження результатів дисертаційного дослідження.

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язано актуальну наукову задачу вдосконалення математичної моделі електрокардіосигналу та розроблення методу аналізу його, засобами цієї моделі, для підвищення інформативності систем голтерівського моніторингу.

При цьому отримано такі результати:

1. У результаті проведеного порівняльного аналізу відомих математичних моделей електрокардіосигналу, зареєстрованого впродовж доби, сформульовано основні вимоги до математичної моделі: врахування поєднання властивостей періодів двох ритмів електрокардіосигналу, можливість застосування для задач

оперативного виявлення змін функціонального стану серцево-судинної системи.

2. Обґрунтовано модель електрокардіосигналу у вигляді кусково-періодично корельованого випадкового процесу, яка на відміну від відомих, враховує зміну електрокардіосигналу впродовж доби та дає змогу визначити статистичні оцінки імовірнісних характеристик.

3. Розроблено метод статистичного опрацювання добового електрокардіосигналу, з використанням формалізованої і автоматизованої процедури, який дає змогу своєчасно виявити приховані патологічні зміни у функціонуванні серця людини.

4. Установлено, що отримані значення оцінок спектральних компонент є характеристиками інформативних ознак добового електрокардіосигналу із достовірністю оцінювання 0,9785 при ймовірності помилки 0,001 та характеризують функціональний стан серцево-судинної системи.

5. Розроблено комп'ютерну імітаційну модель електрокардіосигналу базуючись на удосконаленій математичній моделі для потреб верифікації і тестування розроблених методів опрацювання електрокардіосигналів у системах голтерівського моніторингу.

6. Розроблено пакет комп'ютерних програм для статистичного опрацювання добових електрокардіосигналів, готовий для використовуватися як складової частини спеціалізованого програмного забезпечення систем голтерівського моніторингу.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Дедів Л. Обґрунтування математичної моделі добового електрокардіосигналу у вигляді кусково-періодично корельованого випадкового процесу / Я.Драган, Л.Дедів // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулля, 2010. – Т. 15, № 2. – С. 154-158.

2. Дедів Л.Є. Метод візуалізації добових електрокардіосигналів для систем голтерівського моніторингу / Л.Є.Дедів, В.П.Забитівський, М.О.Хвостівський // Український журнал телемедицини та медичної телематики. – Донецьк: ТОВ „Цифрова типографія”, 2010. – Т. 8, №1. – С. 22-25.

3. Дедів Л.Є. Опрацювання добового електрокардіосигналу синфазним методом для підвищення інформативності систем голтерівського моніторингу / Л.Є.Дедів, М.О.Хвостівський, Г.М.Осухівська // Вісник Хмельницького національного університету. – Хмельницький: ХНУ, 2010. – № 3. – С. 212-216.

4. Імітаційна модель електрокардіосигналу / [Дунець В.Л., Хвостівський М.О., Дедів Л.Є., Гевко О.В] // Міжвузівський збірник „Наукові нотатки” Луцького державного технічного університету. – Луцьк: ЛДТУ, 2008. – № 21. – С. 83-88.

5. Імітаційна модель електрокардіосигналу на основі періодично корельованого випадкового процесу / [М.Хвостівський, Л.Дедів, В.Дунець, Г.Шадріна.] // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль: ТДТУ ім. І.Пулля, 2008. – №3. – С. 201-205.

6. Дедів Л.Є. Імітаційна модель електрокардіосигналу на основі кусково-періодично корельованого випадкового процесу із врахуванням його циркадної

динаміки / Л.Є.Дедів // Науковий вісник Чернівецького університету: Збірник наук. праць. Вип. 423: Фізика. Електроніка.: Тематичний випуск “Комп’ютерні системи та компоненти”. – Чернівці: Рута, 2008. – Ч. 1. – С. 50-53.

7. Дедів Л. Імітаційна модель електрокардіосигналу / Л.Дедів, В.Дунець, Т.Легкий // Матеріали дванадцятої наукової конференції Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя. – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2008. – 11с.

8. Дедів Л. Опрацювання добового електрокардіосигналу синфазним методом / Л.Дедів, Я.Драган // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» присвяченої 50-річчю заснування ТНТУ та 165-річчю з дня народження Івана Пулюя. – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2010. – 428 с.

9. Дедів Л.Є. Математична модель добового електрокардіосигналу у вигляді кусково-періодично корельованого випадкового процесу /Л.Є. Дедів, Я.П Драган, М.О.Хвостівський // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2010». Технические науки. – Одесса: Черноморье, 2010. – Т. 3. – 70 с.

10. Дедів Л.Є. Використання алгебри алгоритмів для синтезу алгоритму опрацювання біомедичних сигналів / Л.Є.Дедів, Я.П.Драган, М.О.Хвостівський // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте '2010». Технические науки. – Одесса: Черноморье, 2010. – Т. 4. – 11 с.

11. Дедів Л. Використання алгебри алгоритмів для оптимізації складності синфазного алгоритму опрацювання електрокардіосигналів в системах голтерівського моніторингу / М. Хвостівський, Л.Дедів // Збірник тез доповідей XIV наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2010. – 36с.

АНОТАЦІЯ

Дедів Л.Є. Математична модель добового електрокардіосигналу для підвищення інформативності систем голтерівського моніторингу. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2011 р.

У дисертаційній роботі розв’язано актуальне наукове завдання – удосконалено математичну модель електрокардіосигналу та розроблено метод аналізу його, сформованого на базі цієї моделі, для підвищення інформативності систем голтерівського моніторингу.

Обґрунтовано нове застосування кускового періодично корельованого випадкового процесу як математичної моделі електрокардіосигналу, зареєстрованого впродовж доби, яка враховує у своїй структурі поєднання

властивостей періодичності і стохастичності з добовим ходом. На базі цієї моделі розроблено метод дослідження електрокардіосигналу серця людини у системах голтерівського моніторингу. Установлено, що отримані спектральні компоненти є інформативно-достовірними ознаками електрокардіосигналу і відповідають функціональному стану серцево-судинної системи людини. Використовуючи методи статистичної теорії вибору рішень, визначено достовірність оцінок спектральних компонент електрокардіосигналу з використанням формалізованої і автоматизованої процедури, яка дає змогу із підвищеною достовірністю та оперативно оцінити стан серцево-судинної системи людини на початковому сегменті її захворювання.

Розроблено метод (програма і алгоритм) імітаційного моделювання електрокардіосигналу на основі кускової періодично корельованої випадкової послідовності. Створено пакет комп'ютерних програм для автоматизованого опрацювання електрокардіосигналу та проведення імітаційних експериментів для автоматизованих систем голтерівського моніторингу.

Ключові слова: електрокардіосигнал, система голтерівського моніторингу, кусковий періодично корельований випадковий процес, спектральні компоненти, достовірність, верифікація, комп'ютерне імітаційне моделювання.

АННОТАЦИЯ

Дедив Л.Е. Математическая модель суточного электрокардиосигнала для повышения информативности систем холтеровского мониторинга. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук за специальностью 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2011 г.

В диссертационной работе решено актуальное научное задание - усовершенствована математическая модель электрокардиосигнала и разработан метод анализа его, сформированного на базе этой модели, для повышения информативности систем холтеровского мониторинга.

Учитывая сложность и структуру электрокардиосигнала в системах холтеровского мониторинга проанализированы его характеристики в рамках детерминированного подхода и с позиций стохастического подхода (методами теории стационарных случайных процессов). Полученные результаты анализа методами гармонического анализа в рамках детерминированного подхода подтверждают, что получены амплитудные спектры отдельных циклов электрокардиосигнала является переменчивыми, то есть содержат определенную случайность. Рассматривая сигнал в рамках стационарной модели, замечено, что дисперсия трансформируется во времени, а корреляционная функция электрокардиосигнала, как сплошной реализации, является периодической.

Из анализа свойств вероятностных характеристик электрокардиосигнала и описанных свойств кусковой-периодически коррелируемых случайных процессов vyplывает, что математическая модель процесса такого класса дает возможность адекватно описать сигнал, а именно учесть сочетание случайности и периодичности сигнала, и также учесть в своей структуре взаимосвязи между разными стадиями электрокардиосигнала зарегистрированного на протяжении суток, а потому и разработать методы определения инвариантных информационных признаков его, выходя из статистики таких сигналов для задач своевременной диагностики.

На базе математической модели электрокардиосигнала в виде кускового периодически коррелируемого случайного процесса обоснованно использование спектрально-корреляционного метода для получения информативных признаков электрокардиосигнала путем применения синфазного метода анализа.

Разработан метод компьютерной обработки электрокардиосигнала в системах холтеровского мониторинга, который дал возможность расширить возможность своевременной диагностики состояния сердца человека путем внедрения в область кардиологии нового класса информативно-достоверных признаков - спектральные компоненты, которые характеризуют изменения фазово-часовой структуры сигнала, и этим дают возможность обнаружить на ранней стадии нарушение в работе сердца человека.

Применены методы статистической теории принятия решения для определения достоверности результатов оценивания спектральных компонент электрокардиосигнала. В частности для оценивания достоверности спектральных компонент электрокардиосигнала использован статистический критерий принятия решения Неймана-Пирсона. Результаты оценивания достоверности подтвердили актуальность использования спектральных компонент электрокардиосигнала как инвариантно информативных признаков, с помощью которых можно с высокой достоверностью 0,9785-0,9861 оценить состояние сердечно-сосудистой системы, в частности сердце.

Разработан метод (программа и алгоритм) компьютерного имитационного моделирования электрокардиосигнала на основе кускового периодически коррелируемой случайной последовательности для потребностей тестирования разработанных алгоритмов его прорабатывания. Проведено исследование вероятностных характеристик разработанной компьютерной имитационной модели, что дало возможность подтвердить соответствие компьютерной имитационной модели усовершенствованной математической модели электрокардиосигнала с максимальным значением модуля разницы вероятностей экспериментального и имитируемого сигнала для нормы представляет $6.5 \cdot 10^{-6}$.

Ключевые слова: электрокардиосигнал, система холтеровского мониторинга, кусковой периодически коррелируемый случайный процесс, спектральные компоненты, достоверность, верификация, компьютерное имитационное моделирование.

SUMMARY

Dediv L. A mathematical model of day's electrocardiosignal for the increasing of informativity of the holter monitoring systems. - Manuscript.

In dissertation the actual scientific task is solved - the mathematical model of electrocardiosignal is improved and the method of analysis of him is worked out, formed on the base of this model, for the increase of informing of the systems of the holter monitoring.

New application of the piecemeal periodically correlated random process is reasonable as a mathematical model of electrocardiosignal registered for a day long, which takes into account in the structure combination of properties of periodicity with a stochastic. On the base of reasonable model the method of research of electrocardiosignal heart of man is worked out in the systems of the holter monitoring, with the use of the formalized and automated procedure which enables with the increased authenticity and operatively to estimate the state of the cardiovascular system of man on the initial stage of her disease. Set, that spectral component is got are the informing-reliable signs of electrocardiosignal and answer the functional state of the cardiovascular system of man. Using the methods of statistical theory of choice of decisions authenticity of estimations of spectral component of electrocardiosignal is certain.

An of of simulation of electrocardiosignal technique (program and algorithm) is worked out on the basis of the lump periodically correlated casual sequence. The of of package of computer softwares is created for the automated working of electrocardiosignal and realization of imitation experiments for automated systems of the holter monitoring.

Key words: electrocardiosignal, system of the holter monitoring, lump periodically correlated random process, spectral components, verification, computer imitation modelling.