

УДК 004.41:616.12-073.96/97

Н. С. Луцик, Я. В. Литвиненко, С. А. Лупенко, А. М. Зозуля

## ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОРФОЛОГІЧНОГО АНАЛІЗУ ТА АНАЛІЗУ СЕРЦЕВОГО РИТМУ З ПІДВИЩЕНОЮ ІНФОРМАТИВНІСТЮ

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль

Анотація. У даній роботі удосконалено програмний комплекс аналізу кардіосигналів, шляхом доповнення його новими програмними модулями, що реалізують нові методи аналізу серцевого ритму та морфологічного аналізу кардіосигналів. За рахунок використання нової математичної моделі сигналів серця у вигляді умовного циклічного випадкового процесу та нових методів його опрацювання, комплекс дає змогу проводити автоматизований статистичний морфологічний аналіз та аналіз ритму кардіосигналів із підвищеною інформативністю, що уможливило підвищення точності та достовірності діагностики стану серцево-судинної системи організму людини. Удосконалений програмний комплекс може бути використаний як складова частина програмного забезпечення автоматизованої діагностичної системи для комплексного морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму на ЕОМ.

**Ключові слова:** програмний комплекс, математична модель, серцевий ритм, сигнали серця.

Аннотация. В данной работе усовершенствовано программный комплекс анализа кардиосигналов, путем дополнения его новыми программными модулями, реализующими новые методы анализа сердечного ритма и морфологического анализа кардиосигналов. За счет использования новой математической модели сигналов сердца в виде условного циклического случайного процесса и новых методов его обработки, комплекс позволяет проводить автоматизированный статистический морфологический анализ и анализ ритма кардиосигналов с повышенной информативностью, что позволило повышения точности и достоверности диагностики состояния сердечно-сосудистой системы организма человека. Усовершенствованный программный комплекс может быть использован как составная часть программного обеспечения автоматизированной диагностической системы для комплексного морфологического анализа и анализа сердечного ритма на ЭВМ.

**Ключевые слова:** программный комплекс, математическая модель, сердечный ритм, сигналы сердца.

Abstract. In the present study, the existing software for the analysis of cardiosignals was improved. There were implemented the new methods of the analysis of heart rhythm and morphological analysis of cardiosignals. For this purpose, the mathematical model of cardiosignals in the form of conditional random cyclic process was used, as well as the methods of its processing, proposed by the authors. The present software allows to perform the automated statistical morphological analysis and the analysis of the cardiorythm with increased informativeness. The accuracy and reliability of the diagnosis of the cardiovascular system state of the human body were increased. These improved software can be used as a part of the automated diagnostic system of the heart rhythm analysis.

**Key words:** software, mathematical model, heart rhythm, cardiac signals.

### Вступ

На сьогоднішній день захворювання серцево-судинної системи людини посідають перше місце у світі за поширеністю та спричиняють понад половину всіх випадків смерті. Тому, розробка високоінформативних комп'ютерних систем автоматизованої діагностики функціонального стану серцево-судинної системи людини за зареєстрованими кардіосигналами, є актуальною науково-технічною задачею, вирішення якої, сприятиме підвищенню якості та ефективності медичного обслуговування населення, а також суттєво зменшить обсяг рутинних робіт лікаря-кардіолога.

У роботах [1, 2], на основі теорії циклічних випадкових процесів, обґрунтовано нові математичні моделі та методи опрацювання широкого класу сигналів серця електричної, магнітної та акустичної природи, що дало змогу підвищити точність та достовірність медичної діагностики функціонального стану серця та серцево-судинної системи людини. У роботі [3], розроблено програмний комплекс для моделювання та аналізу кардіосигналів, який втілює відповідні нові моделі та методи їх опрацювання.

### Актуальність

Розробці математичних моделей та методам обробки циклічних сигналів серця в комп'ютерних кардіодіагностичних системах присвячена значна кількість наукових праць [4-7].

Удосконаленим підходом до моделювання та аналізу кардіосигналів є підхід із використанням умовного циклічного випадкового процесу та його випадкової функції ритму [8], що дало змогу підвищити інформативність аналізу кардіосигналів завдяки врахування їх подвійної стохастичності - стохастичності ритму та стохастичності морфологічної структури кардіосигналів.

Дану роботу присвячено удосконаленню програмного комплексу, де на відміну від попередньої розробки, у комплекс імплементовано новий підхід до моделювання та опрацювання кардіосигналів на базі умовного циклічного випадкового процесу та його випадкової функції ритму, що дає змогу отримувати повнішу діагностичну інформацію про стан серцево-судинної системи людини.

### Мета

Мета роботи полягає в удосконаленні програмного комплексу для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму, шляхом доповнення його новими програмними модулями, що реалізують нові методи аналізу серцевого ритму та морфологічного аналізу, які ґрунтуються на використанні нової математичної моделі сигналів серця, у вигляді умовного циклічного випадкового процесу [8].

### Задачі

1. Обґрунтувати математичний апарат програмного комплексу для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю.

Модернізувати структурно-функціональну схему програмного комплексу та удосконалити програмний комплекс для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю з використанням середовища Delphi 7.

2. Провести апробацію програмного комплексу на реальних статистичних даних.

### Розв'язання задач

Наведемо основні математичні залежності, які лежать в основі математичного забезпечення удосконаленого програмного комплексу. Загалом, програмний комплекс дає змогу здійснювати морфологічний аналіз кардіосигналів та аналіз їх ритму. Морфологічний аналіз полягає в статистичному оцінюванні ймовірнісних характеристик (математичного сподівання, дисперсії, моментних функцій вищого порядку, змішаних моментних функцій) кардіосигналу на основі таких статистик.

Реалізація оцінки математичного сподівання кардіосигналу визначалася за формулою [2]:

$$\hat{m}_\xi(t) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \xi_\omega(t + T(t,1)), t \in \mathbf{W}_1 = [T_1, T_2), \quad (1)$$

де  $M$  - кількість циклів процесу,  $\xi_\omega(t)$  - зареєстрована реалізація кардіосигналу,  $T(t,1)$  - дискретна функція ритму кардіосигналу,  $\mathbf{W}_1$  - область визначення першого кардіоциклу.

Реалізація оцінки дисперсії кардіосигналу визначалась так:

$$\hat{d}_\xi(t) = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{n=1}^{M-1} [\xi_\omega(t + T(t,1)) - \hat{m}_\xi(t + T(t,1))]^2, t \in \mathbf{W}_1 = [T_1, T_2). \quad (2)$$

Використовуючи формули (1), (2), проведено статистичну обробку ЕКС результати якої подано на рис. 5. Автокореляційна функція в межах циклу, автокореляційна функція за межами циклу та коваріаційна функції обчислювали згідно виразів (3-5):

$$\begin{aligned} \hat{R}_\xi(t_1, t_2) &= \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{n=1}^{M-1} (\xi_\omega(t_1 + T(t_1,1)) - \hat{m}_\xi(t_1 + T(t_1,1))) \cdot \\ &\cdot (\xi_\omega(t_2 + T(t_2,1)) - \hat{m}_\xi(t_2 + T(t_2,1))), t_1, t_2 \in \mathbf{W}_1 = [T_1, T_2), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\tilde{R}_\xi(t_1, t_2) = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{n=1}^{M-1} (\xi_\omega(t_1 + T(t_1,1)) - \hat{m}_\xi(t_1 + T(t_1,1))) \cdot (\xi_\omega(t_2 + T(t_2,1)) - \hat{m}_\xi(t_2 + T(t_2,1))),$$

$$t_1 \in \mathbf{W}_1 = [T_1, T_2), t_2 \in \mathbf{W} = \bigcup_{i=1}^{M-1} \mathbf{W}_i, \mathbf{W}_i = [T_i, T_{i+1}), \quad (4)$$

$$\hat{C}_\xi(t_1, t_2) = \frac{1}{M-1} \cdot \sum_{n=1}^{M-1} (\xi_\omega(t_1 + T(t_1,1))) \cdot (\xi_\omega(t_2 + T(t_2,1))),$$

$$t_1 \in \mathbf{W}_1 = [T_1, T_2), t_2 \in \mathbf{W} = \bigcup_{i=1}^{M-1} \mathbf{W}_i, \mathbf{W}_i = [T_i, T_{i+1}). \quad (5)$$

На відміну від відомого аналога програмного комплексу в удосконаленому програмному комплексі є можливість оцінити змішані моментні функції при зміні їх аргументів не лише в межах тривалості одного кардіосигналу, а і за межами циклу, що надає додаткову інформацію про стан серцево-судинної системи.

Математичний апарат для аналізу серцевого ритму із підвищеною інформативністю ґрунтується на статистичному оцінюванні ймовірнісних характеристик випадкової функції ритму кардіосигналу. Використані методи аналізу забезпечують зростання «роздільної здатності», інформативності аналізу серцевого ритму за рахунок статистичного аналізу не лише R-R-інтервалів, що задають тривалість серцевих циклів, а шляхом виявлення статистичних закономірностей для більшої кількості часових інтервалів, що розділяють однофазні відліки електрокардіограми. Наприклад, такими однофазними відліками електрокардіограми можуть бути початки P-зубців, Q-зубців, R-зубців, S-зубців, T-зубців, U-зубців. Тобто, об'єктом статистичного аналізу ритму є множина послідовностей часових інтервалів між однофазними відліками електрокардіограми, а саме, послідовності  $TT(t_{T,n})$ ,  $PP(t_{P,n})$ ,  $QQ(t_{Q,n})$ ,  $RR(t_{R,n})$ ,  $SS(t_{S,n})$ , що формуються згідно формул:

$$\begin{aligned} PP(t_{P,n}) &= P(t_{P,n}) - P(t_{P,n-1}); \\ QQ(t_{Q,n}) &= Q(t_{Q,n}) - Q(t_{Q,n-1}); \\ RR(t_{R,n}) &= R(t_{R,n}) - R(t_{R,n-1}); \\ SS(t_{S,n}) &= S(t_{S,n}) - S(t_{S,n-1}); \\ TT(t_{T,n}) &= T(t_{T,n}) - T(t_{T,n-1}); \\ UU(t_{U,n}) &= U(t_{U,n}) - U(t_{U,n-1}); \quad n = \overline{2, N}, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $P(t_{P,n})$ ,  $Q(t_{Q,n})$ ,  $R(t_{R,n})$ ,  $S(t_{S,n})$ ,  $T(t_{T,n})$ ,  $U(t_{U,n})$  – моменти часу початку відповідно P-зубців, Q-зубців, R-зубців, S-зубців, T-зубців, U-зубців, а  $n$  – номер серцевого циклу.

За такого підходу, формується більш інформативна ніж кардіоінтервалограма дискретна функція, яка враховує інформацію не лише про RR інтервали але й PP, TT, QQ, RR, SS інтервали. Вона теоретично може бути як завгодно щільною і перейти (трансформуватися) у функцію дійсного аргументу  $T(t, n)$ ,  $t \in R$ . Цю функцію називають функцією ритму умовного циклічного випадкового процесу [1].

Вище описані методи статистичного оцінювання були втілені у програмний комплекс для морфоаналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю, який складається з двох основних блоків:

1. Блок статистичної обробки кардіосигналів: статистичний морфологічний аналіз кардіосигналів та статистичний аналіз серцевого ритму з підвищеною інформативністю.
2. Блок статистичної обробки зареєстрованих кардіосигналів для задач визначення автокореляційної та коваріаційної функцій в межах циклу та поза межами циклу.

Структурна схема удосконаленого програмного комплексу представлена на рис. 1. Програмний комплекс написаний на мові програмування Delphi 7.

Процедура обробки досліджуваного ЕКС включає інтерполяцію функції ритму, інтерполяцію сигналу, передискретизацію функції ритму, передискретизації сигналу, оцінювання математичного сподівання та дисперсії. Вхідними даними при такій обробці є значення сигналу; дискретна функція ритму; кількість циклів, з яких складається сигнал; кількість зон, з яких складається кожен цикл. Дана частина статистичної обробки передбачає передискретизацію функції ритму та передискретизацію сигналу, тому необхідно задати крок передискретизації, який на порядок менший від кроку дискретизації досліджуваного сигналу.

Вказана схема працює наступним чином. Спочатку завантажуються вхідні дані кардіосигналу та функції ритму. Для контролю вводу правильних даних в комплексі передбачена можливість візуалізації введених даних.

Як приклад, на рис. 2 поданий загальний вигляд інтерфейсу програми для введення даних сигналу та функції ритму, на рис. 3 поданий загальний вигляд інтерфейсу програми для візуалізації даних.

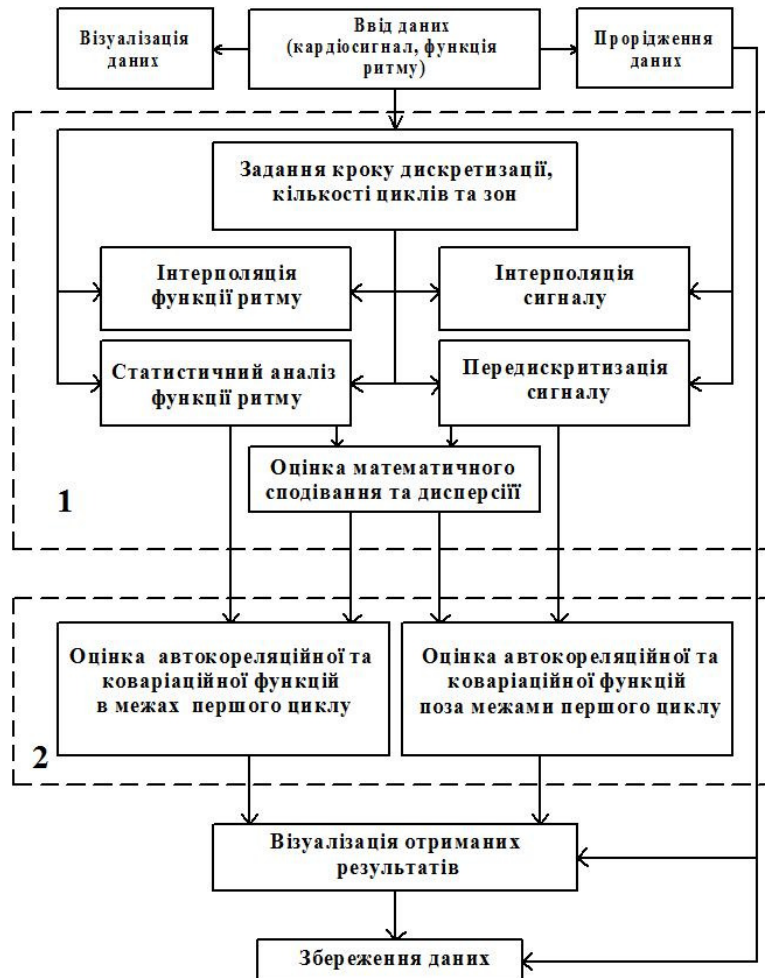


Рисунок 1 – Структурно-функціональна схема програмного комплексу для морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму з підвищеною інформативністю

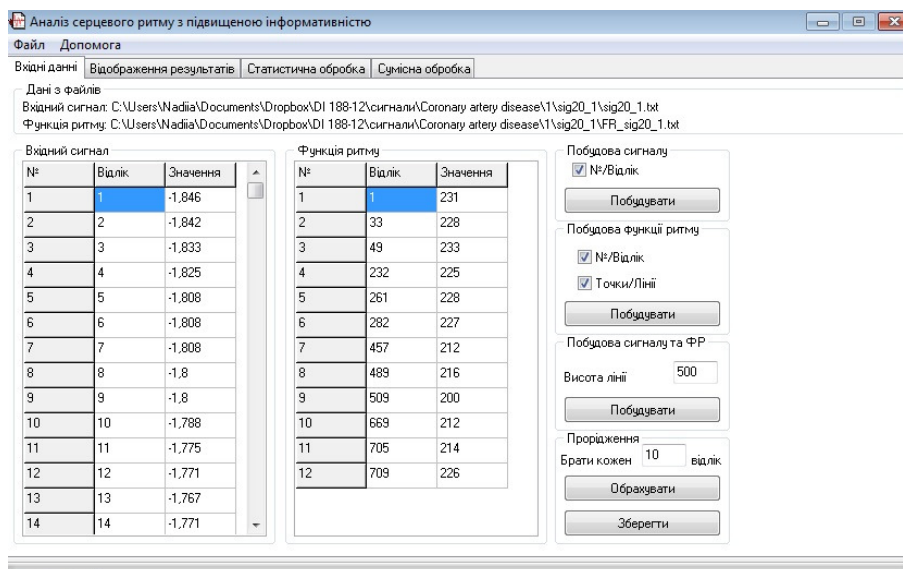


Рисунок 2 – Загальний вигляд інтерфейсу програми для введення даних сигналу та функції ритму

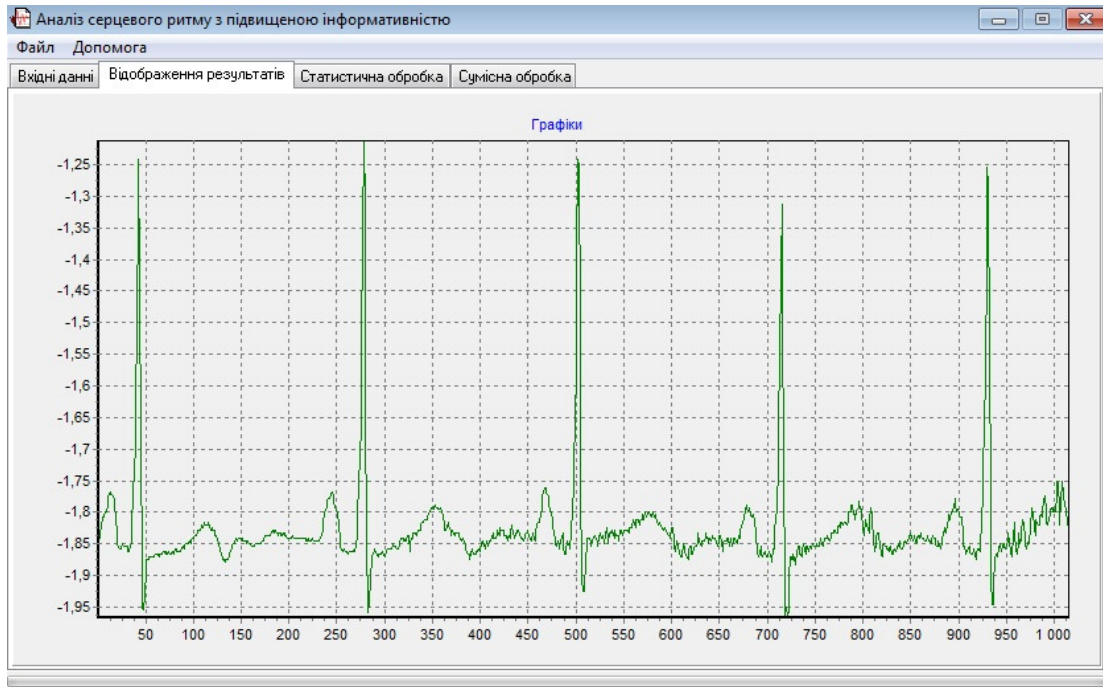


Рисунок 3 – Загальний вигляд інтерфейсу програми для візуалізації даних

Результати послідовних кроків обробки з врахуванням дискретної функції ритму подано на рис. 4.

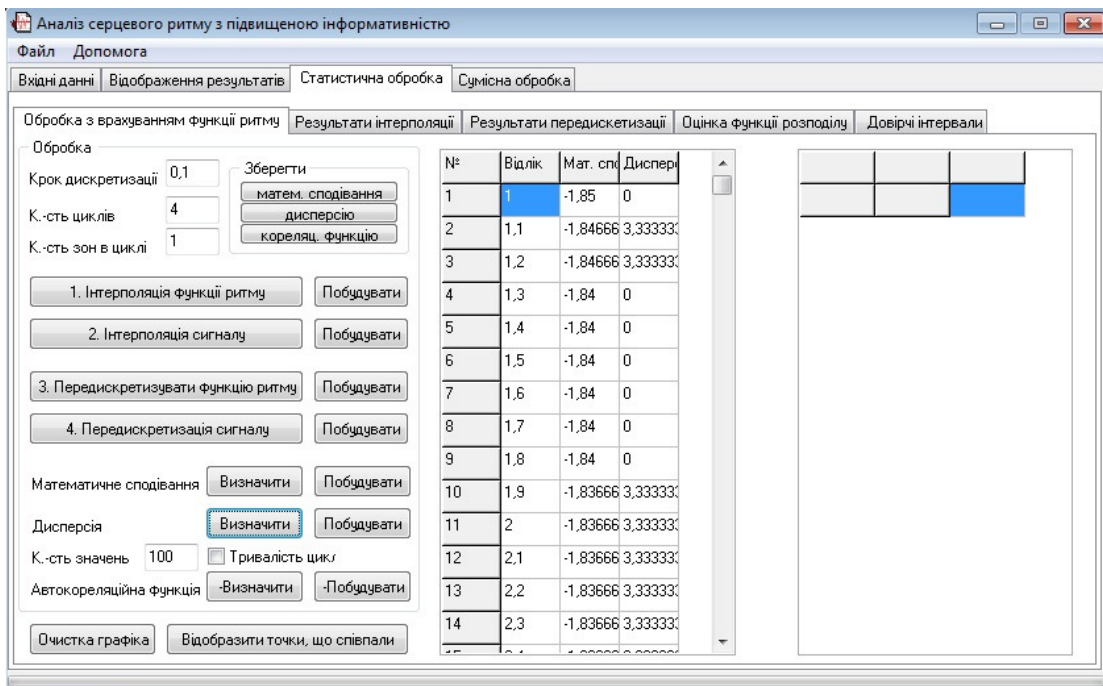


Рисунок 4 – Загальний вигляд інтерфейсу програми для проведення статистичної обробки з врахуванням функції ритму

Приклад отриманих статистичних оцінок математичного сподівання та дисперсії подано на рис. 5.

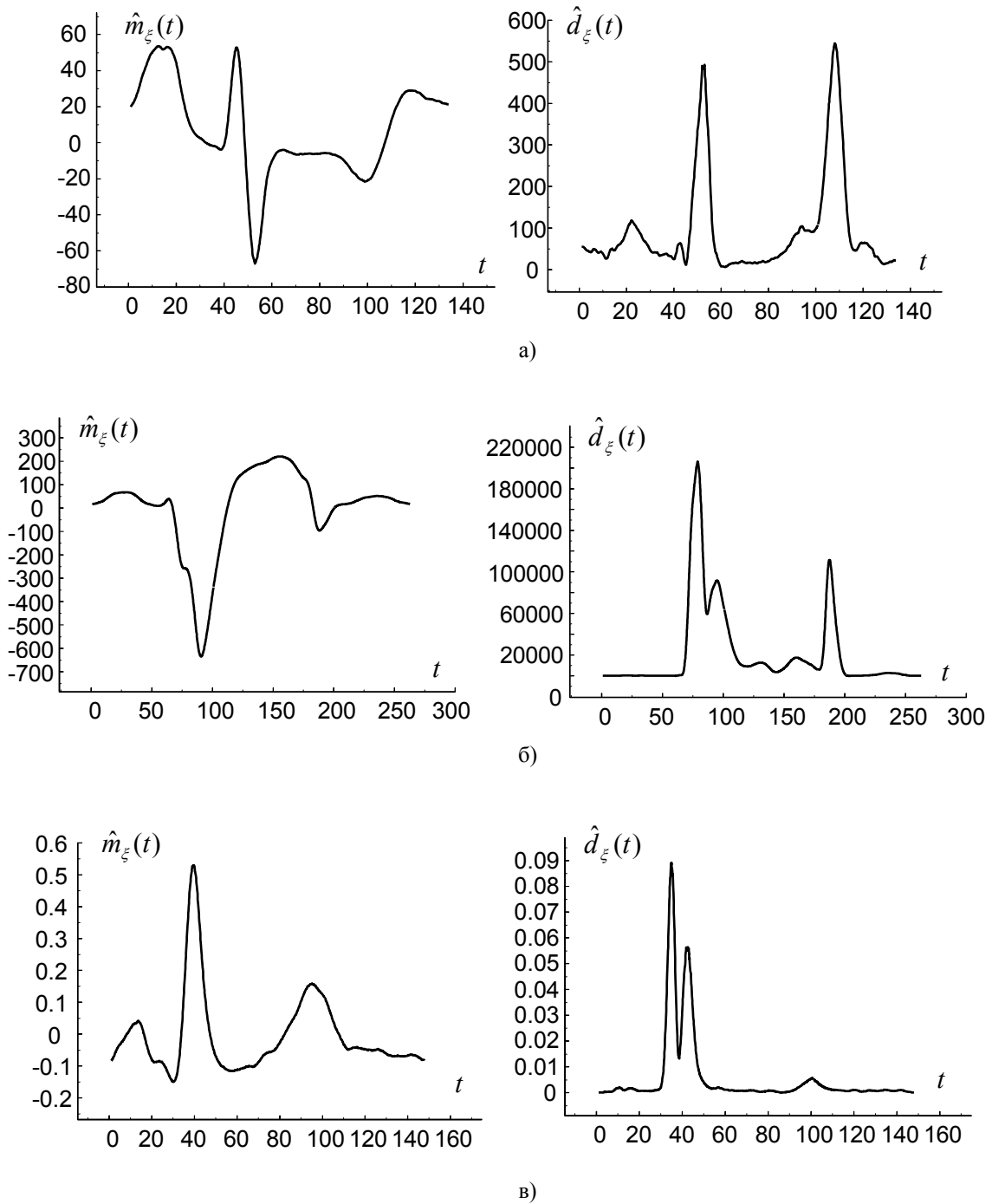


Рисунок 5 – Результати статистичної обробки ЕКС

- а) оцінка математичного сподівання та дисперсії ЕКС з порушеннями морфологічного характеру;
- б) оцінка математичного сподівання та дисперсії ЕКС з порушеним серцевим ритмом;
- в) оцінка математичного сподівання та дисперсії ЕКС умовно здорової людини.

Інтерфейс програмного комплексу для визначення автокореляційної та коваріаційної функцій в межах циклу та поза межами циклу показано на рис. 6.

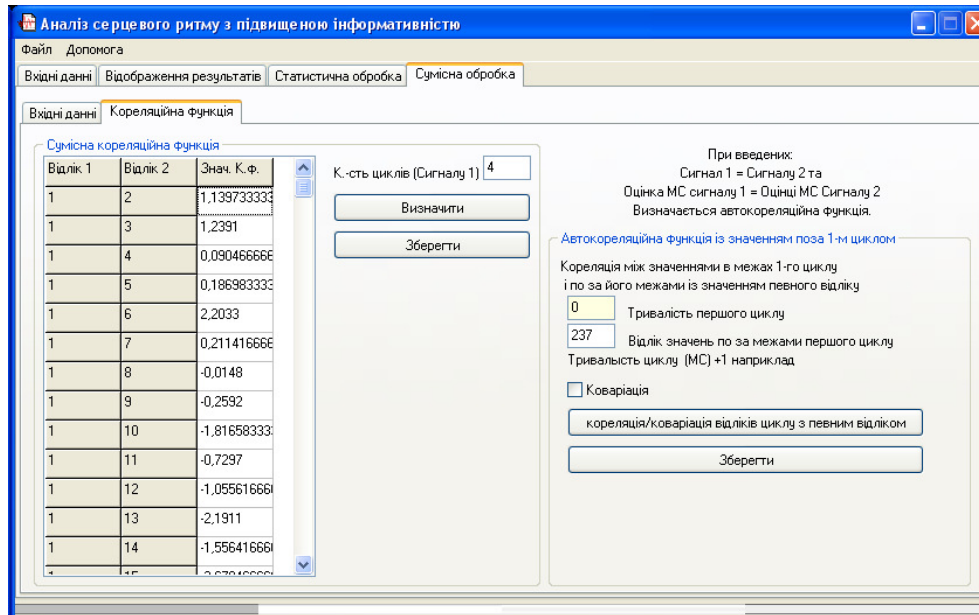


Рисунок 6 – Визначення автокореляційної та коваріаційної функцій

Приклад отриманих статистичних оцінок автокореляційної функції в межах першого циклу та автокореляційної функції поза межами першого циклу подано на рис. 7 та рис. 8.

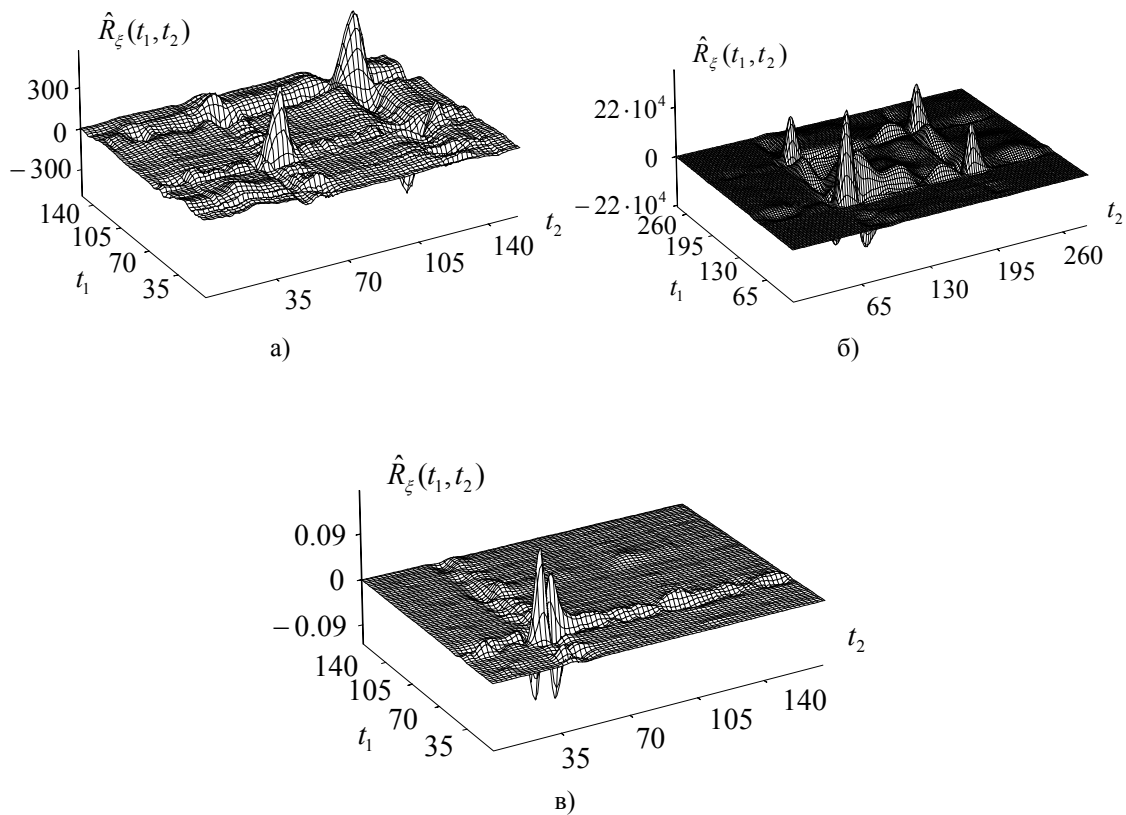


Рисунок 7 – Автокореляційна функція в межах першого циклу ЕКС

а) ЕКС з порушеннями морфологічного характеру;

б) ЕКС з порушенням серцевим ритмом;

в) ЕКС умовно здорової людини.

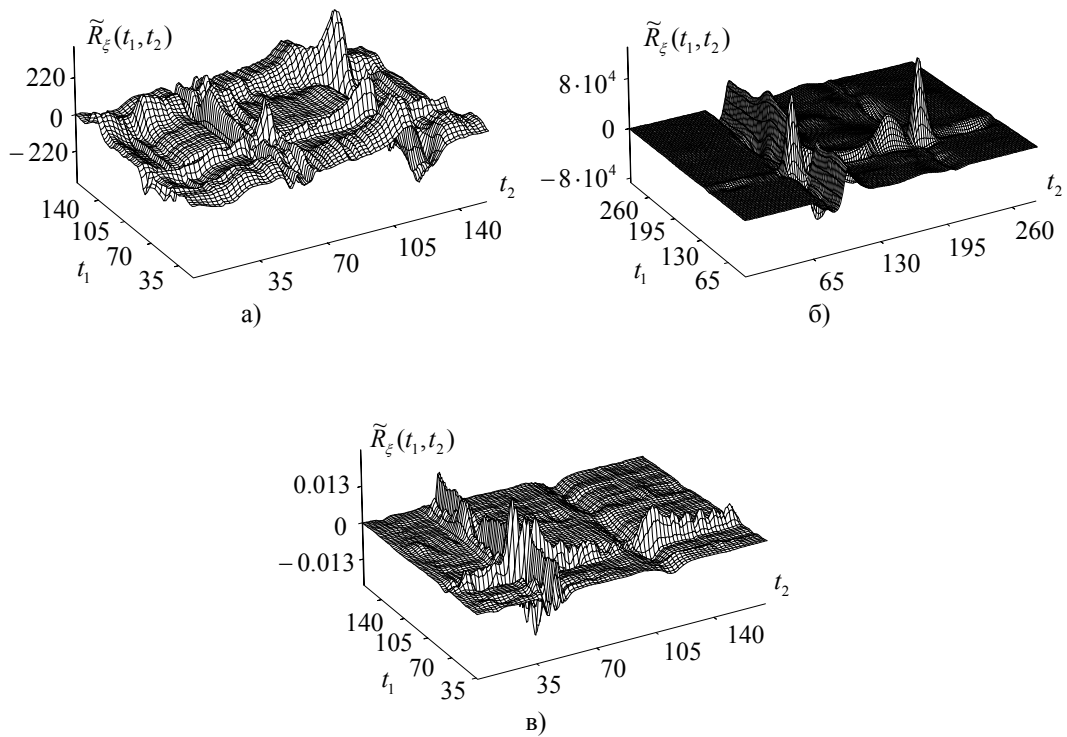


Рисунок 8 – Автокореляційна функція поза межами першого циклу ЕКС

- а) ЕКС з порушеннями морфологічного характеру;
- б) ЕКС з порушенням серцевим ритмом;
- в) ЕКС умовно здорової людини.

Програмний комплекс, за зареєстрованою електрокардіограмою на основі відомих методів [9], дає змогу оцінювати довжини інтервалів PP, TT, QQ, RR, SS для кожного серцевого циклу. Для прикладу графіки сформованих послідовностей  $TT(t_{T,n})$ ,  $PP(t_{P,n})$ , подані на рис. 9.

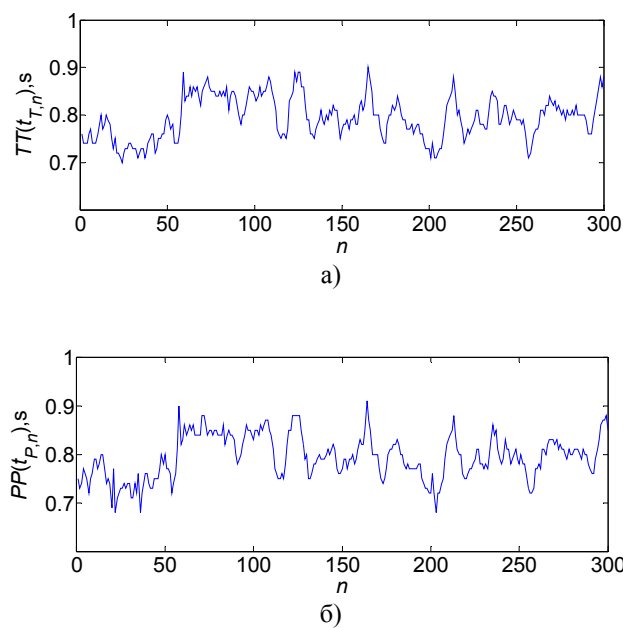


Рисунок 9 – Графіки довжин інтервалів характерних зубців ЕКС  
а) TT інтервалів; б) PP інтервалів



На рис. 10 подано графіки функції густини розподілу та функції розподілу для ТТ і РР інтервалів.

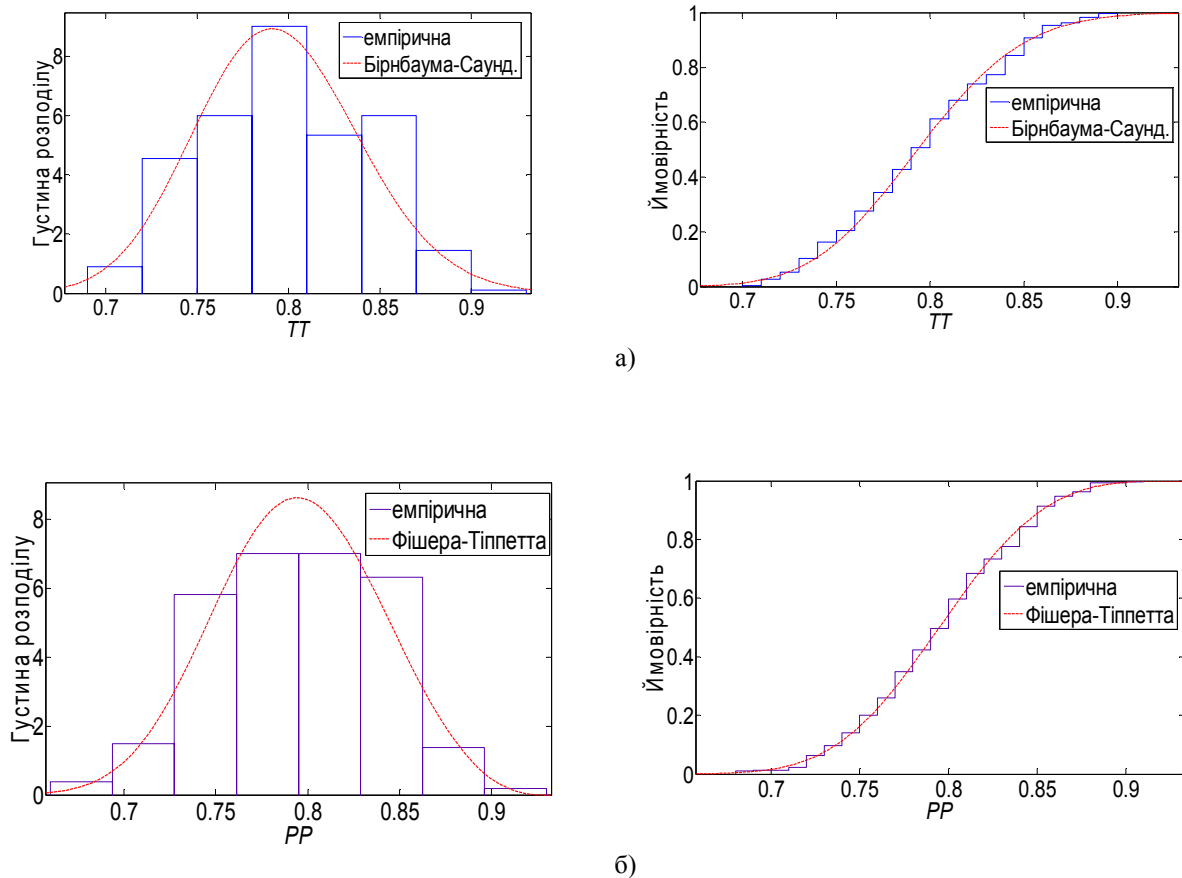


Рисунок 10 – Гістограма, графік функції густини розподілу та функції розподілу  
а) ТТ інтервалів; б) РР інтервалів

Отримані результати дають можливість детальніше оцінювати ритм ЕКС, підвищувати інформативність за рахунок використання інформації про довжини інтервалів РР, ТТ, QQ, RR, SS для кожного серцевого циклу, а також за рахунок використання нових інформаційних ознак у вигляді математичного сподівання, дисперсії, диференціальної та інтегральної функції розподілу.

### Висновки

Удосконалений програмний комплекс завдяки розширенню його математичного апарату, що ґрунтується на новому підході до моделювання та опрацювання кардіосигналів на базі умовного циклічного випадкового процесу та його випадкової функції ритму, дає змогу проводити статистичний морфологічний аналіз та аналіз ритму кардіосигналів із підвищеною інформативністю, що уможливило підвищення точності та достовірності діагностики стану серцево-судинної системи організму людини.

Удосконалений програмний комплекс може бути використаний як складова частина програмного забезпечення автоматизованої діагностичної системи для комплексного морфологічного аналізу та аналізу серцевого ритму на ЕОМ.

Даний програмний комплекс пройшов апробацію на кафедрі фізіології і на кафедрі медичної інформатики Тернопільського медичного університету імені І.Я. Горбачевського та в спільному Українсько-Німецькому товаристві з обмеженою відповідальністю МІДА, м. Київ. На удосконалений програмний комплекс отримано авторське свідоцтво на твір [10].

### Список літератури

1. Лупенко С., Студена Ю. Математичне моделювання сигналів серця в задачах технічної кардіометрії на базі їх моделі у вигляді циклічного випадкового процесу // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2006. -Т. 11, №1. -С.134-142.

2. Литвиненко Я. Методи статистичної обробки сигналів серця на базі їх моделі у вигляді циклічного випадкового процесу із зонною часовою структурою / Я. Литвиненко, С. Лупенко, Ю. Студена // Вісник Тернопільського державного технічного університету. — Тернопіль, 2006. — Т. 11, № 4. — С. 189–200.

3. Литвиненко Я.В. Програмний комплекс для обробки та моделювання синхронно зареєстрованих кардіосигналів з використанням моделей та методів теорії циклічних функціональних відношень / Я.В. Литвиненко, С.А. Лупенко, А.С. Сверстюк // Вісник Хмельницького національного університету. — 2009. — №5. — С.80-87.

4. Драган Я. П. Описание тональных кардиосигналов с помощью модели периодически коррелированных процессов / Я. П. Драган, Г. М. Осухивская // Проблемы управления и информатики, 1999. — № 1 — С. 78–83.

5. Файнзильберг Л. С. Восстановление эталона циклических сигналов на основе использования хаусдорфовой метрики в фазовом пространстве координат / Л. С. Файнзильберг // Кибернетика и системный анализ. — 2003. — № 3. — С. 20–28.

6. Файнзильберг Л. С. Новая информационная технология обработки ЭКГ для выявления ишемической болезни сердца при массовых обследованиях населения / Л. С. Файнзильберг // Управляющие системы и машины. — 2005. — № 3. — С. 63–71.

7. Яворська Є. Б. Верифікація результатів спектрального аналізу ритмокардіограми / Є. Б. Яворська // Міжнародний науково-технічний журнал "Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології". — Вінниця, 2009. — №1 (17). — С. 119–121.

8. С. Лупенко. Математичне моделювання циклічних сигналів серця з врахуванням стохастичності їх ритму та морфологічної структури. // Матеріали всеукраїнської наукової конференції ТДТУ. Тернопіль 2009, С.96.

9. I. Lytvynenko. Segmentation and Statistical Processing of Geometric and Spatial Data on Self-Organized Surface Relief of Statically Deformed Aluminum Alloy. // Iaroslav Lytvynenko, Pavlo Maruschak, Sergiy Lupenko, Sergey Panin // Applied Mechanics and Materials, 2015, Vol. 770, pp. 288-293.

10. Литвиненко Я.В. Комп'ютерна програма «Аналіз серцевого ритму з підвищеною інформативністю» / Я.В. Литвиненко, С.А. Лупенко, Н.С. Луцик // Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір №59323, від 16.04.2015.

Стаття надійшла: 15.02.2016.

#### Відомості про авторів

**Луцик Надія Степанівна** – асистент кафедри комп'ютерних систем та мереж, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, вул. Руська 56.

**Литвиненко Ярослав Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, Руська 56.

**Лупенко Сергій Анатолійович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерних систем та мереж, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, вул. Руська 56.

**Зозуля Андрій Миколайович** – здобувач кафедри комп'ютерних систем та мереж, Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, вул. Руська 56.