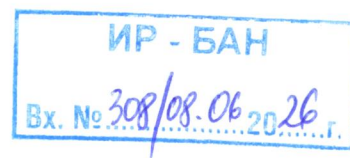


## РЕЦЕНЗИЯ



на дисертационен труд за придобиване на научна степен „Доктор на науките”

Автор на дисертационния труд: доц. д-р инж. Галя Николова Георгиева -  
Цанева

Тема на дисертационния труд: „ХИБРИДНИ ПОДХОДИ ЗА ИЗГРАЖДАНЕ  
НА ДИГИТАЛЕН БЛИЗНАК НА ВАРИАБИЛНОСТТА НА СЪРДЕЧНАТА  
ЧЕСТОТА”

Научна област: Технически науки, Професионално направление: 5.2  
Електротехника, електроника и автоматика, Научна специалност: 02.21.02  
Елементи и устройства на автоматиката и изчислителната техника

Рецензент: проф. д-р инж. Иво Цветанов Илиев

### **1. Актуалност на разработвания в дисертационния труд проблем в научно и научно-приложно отношение**

Качеството на съвременния лечебнодиагностичен процес освен от знанията, уменията и опита на лекарския персонал е в пряка зависимост и от степента на апаратната и инструменталната му обезпеченост. Трайна тенденция, в развитието на медицинската техника, е прилагането на най-новите технологични постижения. Целта от една страна е, да се получи максимална по обем и диагностично достоверна информация, а от друга, да се постигне оптимален лечебен ефект с прилагане на щадящи въздействия. В съвременния диагностичен процес все по-голямо внимание се отделя на превенцията и хващането на ранната симптоматика, което е свързано с продължително проследяване на важни параметри и процеси в естествената жизнена среда на пациента, без ограничения в ежедневните му дейности. Вариабилността на сърдечната честота (HRV) е важен витален показател, носещ информация за автономната регулация, физиологичния стрес, умората и адаптационните механизми на организма. Изследванията в дисертационния труд са насочени именно към изграждане на дигитален близнак на HRV, обединяващ анализ, моделиране и защита на данни, с приложение в интелигентния мониторинг и персонализираната медицина.

### **2. Степен на познаване състоянието на проблема и творческа интерпретация на литературния материал**

Обзорната част представлява задълбочено литературно проучване и свидетелства за творческа интерпретация на постигнатите резултати и насоките за бъдещо развитие в предметната област на дисертационния труд.

Фокусът е върху аспекти пряко свързани със съдържанието на отделните глави в дисертационния труд, като:

- Методи за филтрация, детекция, симулация и оценка на физиологични състояния на базата на съвременни подходи за анализ и обработка на електрокардиографски (ECG) и фотоплетизмографски (PPG) сигнали;
- Специфични изисквания и методи за защита на кардиологични данни при телемедицински приложения;
- Разграничаване на физиологични състояния при спортисти и при изпълнение на дейности свързани със сериозни физически натоварвания.

Цитирани са общо 235 литературни източника, като по-голямата част са от последните десет години. Всички източници са цитирани на подходящо място в текста и подкрепят адекватно тезите на автора.

В края на обзорната глава са направени изводи относно: (1) - чувствителността на PPG и ECG сигналите към шумове и артефакти от движение, силно изразената индивидуална физиологична вариабилност между различни индивиди, както и липсата на интегрални показатели, които да обединяват линейни и нелинейни HRV метрики в единна аналитична рамка; (2) - Ограниченията при дългосрочно прогнозиране на автономната адаптация свързани с липсата на валидирани дигитални близнаци, тествани в реални условия.

### **3. Съответствие на избраната методика на изследване с поставената цел и задачи на дисертационния труд**

В резултат на направения анализ и изводите, относно съвременното състояние на изследванията в областта на дисертационния труд, е дефинирана основната му цел: Разработване и изследване на интегрирана хибридна методологична рамка за обработка, анализ, моделиране и защита на кардиологични сигнали, базирана на съчетаване на класически математически и съвременни AI подходи, подпомагаща изграждането на дигитален близък на вариабилността на сърдечната честота в IoT среди.

Дефинирани са седем задачи за изпълнение, които кореспондират с поставената цел. От цялостното изложение ясно проличава системният подход при решаване на конкретните задачи, включващ:

- Теоретичен анализ и аргументирана оценка на достиженията, както и на нерешените проблеми в областта;
- Синтез и изследване на хибридна методологична рамка за обработка, анализ, моделиране и защита на данни, базирана на съвременни AI подходи, с цел изграждането на дигитален близък на HRV.

- Анализ на получените резултатите и оптимизация на разработените методи и алгоритми за постигане на необходимата достоверност.

#### **4. Обща аналитична характеристика на дисертационния труд.**

Представянето на дейностите свързани с изпълнението на формулираните задачи обхваща 5 глави от дисертационния труд. В началото – обзорната част от дисертацията, се дискутират теоретични постановки свързани с два от основните методи за HRV анализ, а именно на базата на регистрирани ECG и PPG сигнали. Подробно са разгледани отделните аспекти свързани както с параметрите на сигналите, така и с насложените върху тях смущения, особено в условия на свободно движение на изследвания субект. Разгледани са различни методи за премахване на смущенията и последващ анализ на филтрираните сигнали с цел разпознаване на характерни участъци (R-peak, максимум на пулсовата вълна). Като естествено продължение са представени методите за оценка на вариабилността на сърдечната честота. Освен класическите методи във времевата и честотната област са представени и някои евристични, като метод на Поанкаре в двумерната и в пространствената област, анализ на графичните повторения, количествен анализ на повторенията, експонента на Хърст и анализ на дълговременната зависимост, фрактален и ентропиен анализ на вариабилността на сърдечната честота и др. Следва да се отбележи, че извън традиционните методи останалите са основно апробирани като елементи от научни изследвания и все още са без съществено приложение в клиничната практика. По-нататък в същата глава са представени методи и подходи за симулиране на кардиологични сигнали – физиологични клетъчни модели, генеративни AI, стохастични, генеративни невронни и др., като се отбелязва, че макар и с висока степен на достоверност, все още има известни предизвикателства по отношение на моделирането на реалистични артефакти от движение, както и че липсват холистични симулационни рамки, които да позволяват адаптация на параметрите в реално време в отговор на натоварване, стрес, терморегулация и периферна перфузия. Всичко това ограничава вграждането на HRV симулациите в дигитални близнаци на автономната регулация. По отношение на защитата на кардиологичните данни, от литературното проучване е формулирано заключение, че комбинирането на криптографски техники с методи за цифров воден знак се очертава като ефективна стратегия за повишаване на сигурността.

По първа глава броят на публикациите е 5.

Във втора глава, от дисертацията, са представени разработки свързани с намаляване на смущенията, влияещи при детекцията на характерни участъци в биомелипийнски сигнали. Фокусът е върху анализа на PPG.

Алгоритмите за обработка са (1) - многофакторен уейвлет-базиран метод за адаптивно намаляване на шум в PPG сигнали, включващ DWT с различни базиси, нива на разлагане и прагови правила и (2) - алгоритъм за намаляване на шума в PPG в реално време, предназначен за вграждане в преносими и нискоенергийни устройства, базиран на стандартни цифрови процедури. По отношение на детекцията на максимумите (Р-пиковете) в PPG са представени хибриден уейвлет-базиран метод, използващ честотно-временно преобразуване на сигнала, производни, метод на пресичане на нулевата линия, DWT и прагова обработка, както и метод базиран на интеграция между DWT и два типа невронни мрежи - CNN и LSTM. Общ брой на публикациите по втора глава е 5.

Отделна глава от дисертационния труд е посветена на математическото моделиране на HRV, PPG и ECG сигнали. Относно HRV е използван Гаусово-базиран модел за генериране на вариращи сърдечни ритми, чрез сума от ограничен брой Гаусови функции (три и четири). Доразвитието на модела включва въвеждането на фракталност в симулираните HRV серии, посредством модифициран алгоритъм на Hosking, с променяща се във времето експонента на Хърст; По отношение на PPG сигнала Гаусовият модел за описание на формата на пулсовата вълна е комбиниран със статистическо времево моделиране чрез ARIMA метод, предназначено да възпроизведе дългосрочната нестационарност и циркадната динамика на реалните записи. Моделът е надграден до вариант означен като Deep-SimPPG чрез включване на GAN-усилвател за добавяне на морфологична и шумова динамика, максимално доближаваща синтезирания сигнал до реалния. Финалната част от главата представя нелинеен симулационен модел на ECG сигнали, базиран на Gaussian Mesa Functions (GMF) за морфологично описание на P, QRS и T вълните и хаотичен атрактор на Ръслер за моделиране на вариабилността на RR интервалите. Моделът може да се определи като комплексен с оглед на възможностите за контролируемо формиране на морфологията на сърдечния цикъл и физиологично достоверно възпроизвеждане на нестационарната и фрактална динамика на сърдечния ритъм. Всички предложени модели и методи за анализ и класификация, на HRV, са експериментално валидирани върху реални и/или синтезирани данни, като са оценени чрез стандартни количествени измерители. Получените резултати показват стабилно и детерминирано поведение на моделите при различни условия, включително при наличие на характерен шум за тези типове сигнали. Броят на публикациите по трета глава е 6.

Изхождайки от необходимостта за защита на данните при трансфер между реален субект и неговия виртуален цифров близък, в четвърта глава от дисертационния труд е представен модел за криптографска защита на кардиологични данни. Същността му се състои в последователното прилагане на: (1) - уейвлет трансформация; (2) - хибридна криптография в две стъпки - симетрично криптиране (AES) приложимо при големи обеми данни и асиметрично криптиране (RSA) използвано за сигурно управление и

обмен на симетричните ключове; (3) – цифрово водно маркиране, съдържащо данни за изследвания субект. Представени са резултати от експерименталната валидация на предложения криптографски модел върху осем реални ECG сигнала с определена продължителност, включващи различни морфологични характеристики и амплитудно-времеви вариации. Валидацията е направена и по отношение на алгоритъма за компресия с цел намаляване на обема данни до диагностично важните участъци в сигналите, както и на влиянието на водното маркиране върху диагностичното качество на трансферираните данни след тяхното възстановяване в приемащия тракт. Част от съдържанието в тази глава е анализ и конкретни решения за прилагане на принцип за защита на кардиологични данни, основан на концепцията за регионално-осъзната сигурност. Тази странна формулировка предполага необходимостта от предварителна детекция на диагностично значимите участъци в регистрираните сигнали. Брой публикации по глава четири - 3

Последната глава от дисертационния труд е своеобразно обединение на методологията и алгоритмите, представени, в предходните три глави, в обща концептуална реализация на HRV цифров близък. Проведените изследвания са със спортисти във времеви слотове, преди физическо натоварване, по време на тренировка и 2 (в някои случаи 12) часа след тренировка. Акцентът е върху алгоритмичното идентифициране на физиологични състояния, в реално време, и формирането на интерпретируеми индекси, приложими при клиничен телемониторинг посредством носими устройства. Статистически е оценена информативността на повече от 20 параметъра (индекси) свързани с HRV, както самостоятелно така и взаимно в различни многовекторни комбинации. Например разработеният адаптивен многоиндексен метод за автоматично откриване и сигнализиране на физиологичен риск, реализиран като хибридна система за анализ и вземане на решения, както и формираните три нови индекса FDTI, RDTI и PDTI за оценка на умората/стреса на организма след физическо/психическо натоварване. Получените резултати са подходящо онагледени. Броят на публикациите по тази глава е 6.

##### **5. Научни и/или научно-приложни приноси на дисертационния труд**

Авторските претенции за значимостта на постигнатите резултати в дисертационния труд са формулирани в три категории приноси - научни, научно-приложни и приложни. Преобладават научните, което кореспондира пряко с обхвата на синтезираните алгоритми и методи за пре-процесинг и детекция на пикови стойности в ECG и PPG сигнали. Представеният AI подход, интегриращ уейвлет разлагане, CNN-LSTM архитектура и механизъм за детекция на P-пикове, както и симулационните модели за HRV, PPG и ECG сигнали, (особено моделът GMF-Rössler), могат да бъдат охарактеризирани като откриване на нови закономерности, идентифициране на причинно-следствени връзки и зависимости свързани с подобряване на методите за анализ и обработка на биомедицински сигнали с използването на съвременни технологични решения.

Като значим научно-приложен принос бих открил въвеждането на трите интегрални индекса — FDTI, RDTI и PDTI като измерими критерии за оценка на умора, краткосрочно възстановяване и дългосрочна адаптация при спортисти.

Приложният принос определено е в комплексния подход, съчетаващ методите за обработка и анализ на PPG/ECG, симулиране на HRV, защита на данните при трансфер и като цяло концепцията за реализация на HRV-цифров близък, позволяващ персонализация при проследяване на текущото състояние и предсказване на промени при физически натоварвания на спортисти.

## **6. Преценка на публикациите по дисертационния труд**

Общият брой публикации е 25, от които 14 са в реферирани и индексирани в световно известни бази данни, с научна информация, с IF или SJR (6 с Q1, 2 с Q2, 4 с Q3 и 2 с Q4), а 10 са представени на международни и национални научни конференции, както и в 1 глава от монография. Към момента на подаване на материалите са забелязани 71 цитирания на публикациите по настоящия дисертационен труд, 52 от които в SCOPUS и 19 в други издания.

Публикационната дейност оценена според критериите за придобиване на научна степен „Доктор на науките“ показва, че по показател Г превишението е повече от 4 пъти, а по показател Д - повече от 5 пъти.

## **7. Използване на резултатите от дисертационния труд в научната и социалната практика.**

Не са представени данни за внедряване на научните постижения в практиката. Не е посочен и пряк икономически ефект.

## **8. Оценка на съответствието на автореферата с изискванията**

Авторефератът е в обем от 93 страници и отразява изчерпателно и достоверно съдържанието на отделните части на дисертационния труд, както и приносите на автора. При оформянето му са спазени изискванията за изготвяне на авторефератите по дисертационни трудове.

## **9. Мнения, препоръки, въпроси и забележки.**

По съдържанието на отделните глави:

Втора глава:

1. Както се твърди, едната от целите на предварителната обработка е да се запази в максимална степен формата на първичния PPG сигнал, а след направените обработки сигнала на фиг. 2.1 е различен от този на фиг. 2.4 и 2.5, както е и при сигналите от фиг. 2.14. При такъв силно диференциран, след филтрацията сигнал, детекцията на пиковете може да се реализира с обикновен прагов детектор, но вероятността от грешно разпознаване при наличие на движения също е голяма.

2. Относно представените резултати от валидация на предложени уейвлет-базиран метод за детекция (таблица 2.2) не става ясно дали анализираниите 6 записа са от аотирана база данни, или са от доброволци? Ако е вторият вариант, как са определени локалните позиции на маркерите?

Трета глава:

1. Стр. 75 уточнението за използване на повече Гаусови функции трябва да се отнася за формула 3.4, а не 3.8.
2. Таблица 3.3. има непояснени параметри, напр. TP като параметър при честотен анализ, както и съответни мерни единици  $ms^2$  отнесени към честота.
3. Точка 3.1.6 - не става ясно как се дефинират референтни граници при генериране на симулиран сигнал, при положение, че основополагащи параметри (референтни стойности) са инициирани в самия алгоритъма за симулация?
4. Стр. 97 – представен е анализ по отношение на бързодействието, но не и на консумацията за изпълнение на заложените алгоритми, което е важно при изпълнение от мобилно/носимо устройство.

Четвърта глава:

1. Изложението би спечелило, ако се опише как се определят началата и краищата на диагностично важните сегменти, т. нар. fiducial points.
2. Как ще се определи HRV ако се предават само P, QRS, T?

Пета глава:

1. В т. 5.1.1 се отбелязва, че сигналите се регистрират с ECG холтер, а в следващата точка Поанкаре анализът се прави на базата на PPG сигнали?
2. Обединяването на данните от 10-минутните записи на 22 спортисти при неконтролирано разпознаване на физиологични състояния, чрез HRV и фрактален анализ, подпомогнато от AI алгоритми, не потиска ли индивидуални съществени изменения в HRV, които биха се проявили отчетливо при самостоятелен анализ?
3. При откриване на потенциален риск се прилага предварителна обработка, включваща детрендиране и елиминиране на атипични RR интервали. Това не елиминира ли потенциални аритмии, които може да са индикативни за риск.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представеният дисертационен труд е безспорно актуален, насочен към решаване на редица проблеми свързани с методи, подходи, и конкретни реализации за отдалечено мониториране на сърдечната дейност с носими

(wearable) устройства. Спецификата на подобен тип изследвания е свързана с повишени изисквания към цялостната концептуална реализация, включваща сензори, хардуер, интерфейс за предаване на данни, алгоритми за обработка, съхранение и защита на чувствителна информация. В конкретния случай детайлно е представен и обоснован новаторски подход, базиран на синтеза на цифров близък на варибилността на сърдечната честота, като важен индикативен параметър за физиологичното състояние на спортисти. Обемът на извършената работа надхвърля многократно изискуемият минимум за такъв дисертационен труд. Подходът за решаване на дефинираните задачи е с значителна наукометрична стойност и с доказан научен и научно-приложен характер. Авторката е демонстрирала висок потенциал и опит при теоретичния и експерименталния анализ, при статистическата обработка и практическите реализации. Публикационната дейност намирам за напълно достатъчна, за популяризиране на постигнатите резултати, а броят и мястото на цитирания на отделни трудове, е доказателство за актуалността и значимостта им. Отправените въпроси и препоръки имат за цел да подобрят възприемането на специфичната материя, както и да подпомогнат авторката в бъдещата научно-изследователска дейност.

Подкрепям дисертационния труд и предлагам на доц. д-р инж. Галя Николова Георгиева - Цанева да бъде присъдена научната степен „Доктор на науките” в Научна област: 5.2 Технически науки, професионално направление: Електротехника, електроника и автоматика, научна специалност: 02.21.02 Елементи и устройства на автоматиката и изчислителната техника.

03.06.2026 г.

Изготвил: /

/проф. д-р инж. Иво Илиев/