



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ  
ИНСТИТУТ ПО ИНФОРМАЦИОННИ И  
КОМУНИКАЦИОННИ ТЕХНОЛОГИИ



Петър Росенов Томов

ПРОГНОЗИРАНЕ НА ВРЕМЕВИ РЕДОВЕ С  
ИЗКУСТВЕНИ НЕВРОННИ МРЕЖИ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертация

за придобиване на образователната и научна степен „доктор“  
по докторска програма 02.07.20 "Комуникационни мрежи и системи"  
професионално направление 5.3 "Комуникационна и компютърна техника"

Научен ръководител:

проф. д-р Владимир Василев Монов

София, 2022 г.

Дисертацията е обсъдена и допусната до защита на разширено заседание на секция "Информационни процеси и системи за вземане на решения" на ИИКТ-БАН, състояло се на 12.04.2022 г.

Дисертационният труд е структуриран в увод, изложение от четири глави, заключение, декларация за оригиналност на резултатите, списък на публикациите по дисертационния труд, библиография и приложение. Дисертационният труд е в обем от 157 страници, 68 фигури и 4 таблици, 134 цитирани литературни източника и 1 приложения.

Защитата на дисертацията ще се състои на .....г. от ..... часа в зала ..... на блок .... на ИИКТ-БАН на открито заседание на научно жури в състав:

1. проф. д-р Милена Кирилова Лазарова-Мицева – ТУ-София
2. проф. д-р Коста Петров Бошнаков – ХТМУ
3. проф. д.н. Велислава Норева Любенова – ИР-БАН
4. доц. д-р Татяна Владимирова Атанасова – ИИКТ-БАН
5. проф. д-р Димитър Неделчев Карастоянов – ИИКТ-БАН

Резервни членове:

1. доц. д-р Катя Христова Рашева-Йорданова – УниБИТ
2. доц. д-р Леонид Михайлов Кирилов – ИИКТ-БАН

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в стая ..... на ИИКТ-БАН, ул. "Акад. Георги Бончев", бл. 2

Автор: Петър Росенов Томов

Заглавие: Прогнозиране на времеви редове с изкуствени невронни мрежи

## Увод

В ежедневието човек се сблъсква с много и различни времеви редове, представляващи дискретни случайни величини, подредени в хронологичен ред. Типичен пример са средните дневни температури, количествата продадени горива през годината, стойностите на валутите на финансовите пазари и други. В почти всички области на човешката дейност се наблюдават такива явления и затова те са предмет на изучаване и прогнозиране.

Изкуствените невронни мрежи постигат изключително голяма популярност в последните пет десетилетия. Основното им предимство е възможността да възпроизвеждат нелинейни зависимости с помощта на примерни данни. Приложение намират като инструмент за класификация, разпознаване на образи и прогнозиране. При най-разпространения вариант, изкуствените невронни мрежи представляват насочени тегловни графи. Организацията е на слоеве, като информацията се предава от входния слой към изходния слой. Най-често възлите между отделните слоеве са пълно свързани, което означава, че всеки възел е свързан с всички други възли от съседния слой. Организацията на броя слоеве и колко възли да има във всеки слой е обект на емпирично установяване и силно зависи от естеството на решаваната задача. Процесът на обучение най-често е с тренировъчни примери (обучение с учител) и целта е да се постигне такава оптимална стойност за теглата по ребрата на графа, така че изкуствената невронна мрежа максимално добре да извършва изчисленията, за които е предназначена. Веднъж обучени, изкуствените невронни мрежи са изключително бързо действащи. Тази тяхна характеристика ги прави особено желани в множество индустриални технически решения. Трудностите при употребата на изкуствени невронни мрежи са свързани с времето, необходимо за тяхното обучение. През десетилетията са разработени множество различни алгоритми за търсене на оптимални тегла в мрежата. Двете основни направления алгоритми са градиентни (точни числени алгоритми) и

евристични (най-често стохастични с въведени емпирични правила). Ускоряването на процеса по обучение е основен проблем в практическата употреба на изкуствените невронни мрежи.

## **Цел и задачи**

Цел на настоящия дисертационен труд е да се предложат хибридни алгоритми за ускоряване на обучението при изкуствени невронни мрежи от тип многослоен перцептрон за целите на прогнозирането на времеви редове. За реализиране на тази цел е необходимо да се изпълнят следните задачи:

- \* Да се направи обзорен анализ и класификация на алгоритмите за обучение на изкуствени невронни мрежи от тип многослоен перцептрон;
- \* Да се анализира възможността за комбиниране на различни алгоритми за реализиране на хибридно обучение на изкуствени невронни мрежи от тип многослоен перцептрон;
- \* Да се предложат алгоритми за обучение на изкуствени невронни мрежи от тип многослоен перцептрон в разпределена среда;
- \* Да се предложи подобрене с цел намаляване на времето за обучение на изкуствени невронни мрежи от тип многослоен перцептрон;
- \* Да се предложи софтуерна архитектура за реализиране на мобилни разпределени изчисления за прогнозиране;
- \* Да се направи програмна реализация на предложените хибридни алгоритми за обучение на изкуствени невронни мрежи от тип многослоен перцептрон с цел доказване на тяхната работоспособност;
- \* Да се направи сравнителен анализ за ефективността на познатите алгоритми за обучение на изкуствени невронни мрежи от тип многослоен перцептрон.

## Структура на дисертационния труд

Дисертационният труд е структуриран в увод, изложение от четири глави, заключение, декларация за оригиналност на резултатите, списък на публикациите по дисертационния труд и библиография. Дисертационният труд е в обем от 157 страници, 68 фигури и 4 таблици, 134 цитирани литературни източника и 1 приложение.

В **увода** е изяснена актуалността на проблема и са представени структурата, обектът, предметът, целите и задачите.

В **първа глава** е направен обзорен анализ и класификация на широко използваните алгоритми за обучение на изкуствени невронни мрежи. Определени са предимствата и недостатъците на точните числени алгоритми и на евристичните алгоритми. Представени са възможностите за обучение на изкуствени невронни мрежи при последователни пресмятания, паралелни пресмятания и пресмятания в разпределена среда.

Във **втора глава** е изложена теорията за алгоритмите при обучението на изкуствени невронни мрежи от тип многослоен перцептрон. Предложени са модификации на някои от алгоритмите, които са приложими при прогнозирането на времеви редове. Приложените модификации се отнасят до: 1) определяне на теглата, чрез използване на генетичен алгоритъм, използващ операциите – селекция, кръстосване и мутация. Предложен и анализиран е нов оператор за селекция, основан на създаването на поколения при процедура за рекурсивно спускане. Изследвано е експериментално бързодействието на използваните евристични алгоритми; 2) апроксимиране на криви към множество точки – за инкрементална апроксимация на времеви редове се използват уравнение на права и ред от синус функции. Предложен е подход за пресмятане на коефициентите на синус функциите с оптимизатор, базиран на еволюция на разликите и рояк от частици; 3) обучението на изкуствена невронна мрежа – представен е разгърнат модел на обучението, което цели намиране на оптимални тегла за мрежа от тип

трислоен перцептрон; 4) активационната функция в изкуствени невронни мрежи – предложена е алтернатива на производна за активационната функция в изкуствени невронни мрежи. Съществена особеност на предложената функция, е че показва обещаващи резултати по отношение на бързодействието и точността. За целите на численото тестване на предложените модификации е необходимо класифициране според честотата на гласуване за всеки потребител и процент на успех на всеки подаден глас. Решаването на тази конкретна задача е реализирано чрез използване на самоорганизиращи се карти на Кохонен.

В **трета глава** е представена софтуерна архитектура, позволяваща реализация на избрани алгоритми и предложените модификации. За реализацията на софтуерната архитектура е предложен обектно-ориентиран модел, релационен модел, комуникационните протоколи и графичен потребителски интерфейс. Всички те основаващи се на подходящи структури от данни.

В **четвърта глава** е изложен сравнителен анализ на някои точни числени и евристични алгоритми. Описани са проведените експерименти и получените резултати. Анализирани е тяхната производителност и общо допуснатата грешка.

В **заключението** е направено обобщение на извършените изследвания. Посочени са също така и някои насоки за бъдещи изследвания, свързани с областта на приложението на изкуствените невронни мрежи.

## **Глава 1. Прогнозиране на времеви редове с помощта на машинно самообучение**

В първа глава е направен обзор на най-използваните начини за прогнозиране на времеви редове и по какъв начин машинното самообучение се прилага в тази проблемна област. Разработването на прогнози е от голяма важност за съвременните общества. Като започнем от прогноза за метеорологичната

обстановка и стигнем до прогнози за промяната на цените за стоки, акции и валути. В случая с прогнозирането на цени, данните успешно се представят във формата на времеви ред. Съвсем логично, всяка следваща стойност да има някаква зависимост от предходните стойности. През последните десетилетия са разработени много начини за прогнозиране на финансови времеви редове, но като един от най-обещаващите, се открояват изкуствените невронни мрежи. Характерно за изкуствените невронни мрежи е, че те са много ефективен инструмент, след като веднъж са обучени. Процесът на обучение, от своя страна, често отнема твърде дълго време и се нуждае от голямо количество изчислителни ресурси. Един от най-използваните начини за обучение на изкуствени невронни мрежи е алгоритъмът с обратно разпространение на грешката. Този алгоритъм спада към групата на точните числени, градиентни методи. Негови слабости са невъзможността да бъде ефективно реализиран в паралелни изчисления и склонността му да изпада в локални оптимуми, без да има ефективни способи за избягването им. Алгоритъмът за обратно разпространение на грешката много добре се допълва с евристичните, еволюционни алгоритми за глобална оптимизация. Характерното за този вид евристики е, че те се поддават на изключително висока степен за паралелна обработка. Някои от тези евристики са специално създадени за избягване на локалните оптимуми. Широките възможности за паралелна обработка при еволюционните и популационните евристики позволяват реализацията им на хетерогенни системи за разпределени изчисления. С цел за по-висока финансова ефективност, този вид разпределени изчисления могат да се изпълняват на принципите за дарената изчислителна мощност. Наличието на значително повече мобилни устройства (умни телефони и таблети), спрямо настолните компютърни системи, води до мотивация пресмятанията да се реализират под формата на мобилни разпределени изчисления.

Направено е обобщение на характеристиките на точните числени и

евристични методи за обучение, разгледани в обзорната част.

### Основни изводи:

Всичко изброено до тук, дава основанието да се търси реализация на система за мобилни разпределени изчисления, която обучава изкуствени невронни мрежи с хибриден алгоритъм (обратно разпространение на грешката и популационна глобална оптимизация) за прогнозиране на финансови времеви редове.

## Глава 2. Алгоритми при прогнозиране и обучение на ИНМ

Във втора глава са представени авторски алгоритми. Изследвани са възможностите за подобряване на алгоритъма за селекция в генетичните алгоритми. Прилага се идея за рекурсивно спускане във възли от дървовидна структура, като всеки възел се характеризира с подпопулация. Във всеки възел се извършва пълно изчерпване за рекомбинация на индивидите в прилежащата на възела под популация, като се изчислява целевата функция (Таблица 2.2).

	Michalewicz	Ackley	Schwefel	Rastrigin	Griewank
Local Search	1062492546	531027435	533232986	507650704	592370933
Brute-Force	403141211	166733879	175069174	159862955	218428047

Таблица 2.1 Изразходвано време в милисекунди

	Michalewicz	Ackley	Schwefel	Rastrigin	Griewank
Local Search	641125639	641024362	640914978	641092606	640830762
Brute-Force	235794757	235794757	235794757	235794757	235794757

Таблица 2.2 Брой изчисления на целевата функция

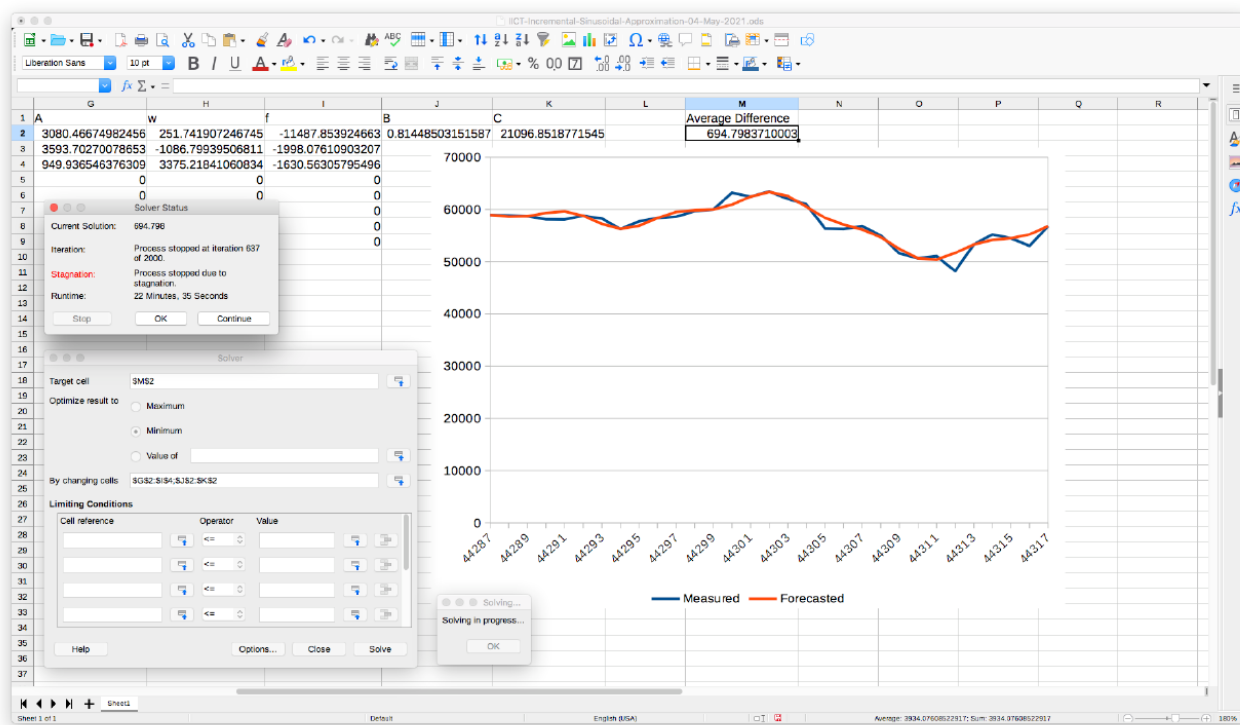


	Michalewicz	Ackley	Schwefel
Local Search	-1484.7137949531716	21.09334816052046	3877924.0971615044
Brute-Force	-1439.2296970724608	21.114702255301292	3919318.729777085
	Rastrigin	Griewank	
Local Search	170204.87849875208	259918.15469527297	
Brute-Force	171780.33307271387	262621.61053178157	

Таблица 2.3 Достигнати субоптимални стойности

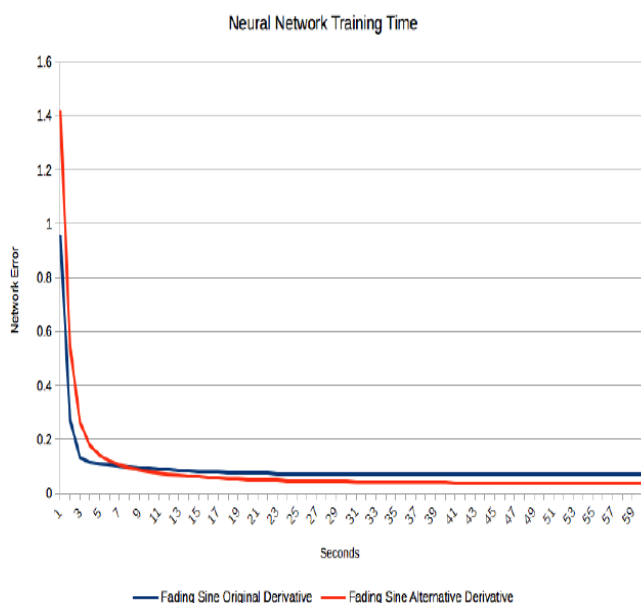
Пълното изчерпване се комбинира и с локално търсене, с цел допълнително подобряване (Таблица 2.1) на резултатите (Таблица 2.3) в конкретния възел. Постигнатите резултати са представени в (Tomov-01, Tomov-02). В публикация (Tomov-01) авторът на настоящия дисертационен труд има 1/3 принос, който се състои в предлагането на представената идея и написването на програмния код за извършване на експериментите, поради което е и водещ автор в публикацията. В публикация (Tomov-02) авторът на настоящия дисертационен труд има 1/3 принос, който се състои в предлагането на представената идея и написването на програмния код за извършване на експериментите, поради което е и водещ автор в публикацията.

Изследвани са възможностите за напасване на криви към множество точки с помощта на уравнение за права и ред от синус функции. Постигнатата крива се използва за генериране на прогноза (Фиг. 2.4), извън диапазона на известните измерени точки. Постигнатите резултати са представени в (Velichkova-01). В публикация (Velichkova-01) авторът на настоящия дисертационен труд има 1/3 принос, който се състои в предлагането на представената идея. Изследвани са възможностите за бързо прототипиране на изкуствени невронни мрежи с помощта на рояк от частици и еволюция на разликите. Постигнатите резултати са представени в (Tomov-04).

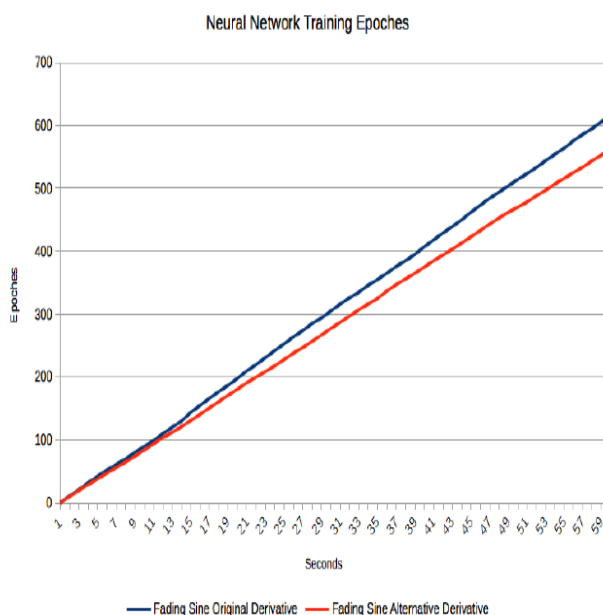


Фиг. 2.4 Апроксимация с права и синус функции

Предложена е алтернатива на първа производна на периодична затихваща синусоида за активационната функция в изкуствени невронни мрежи. Когато активационната функция има периодична компонента, това дава отражение и на нейната първа производна. Периодичният компонент и двете точки на прекъсване водят до забавяне на процеса по обучение. В следствие на тези две усложнения, обучението с обратно разпространение на грешката води до по-бавна сходимост на алгоритъма. Елегантен подход за ускоряване на процеса е подмяната на първата производна с функция, близка по форма, но без периодична компонента и без точки на прекъсване  $f(x) = \exp(-x^2)$ . Направено е сравнение между предложената алтернативна функция и първа производна на периодична затихваща синусоида като активационна функция. Алтернативната функция дава по-добри резултати по отношение на бързодействие и допуснатата грешка (Фиг. 2.5 и Фиг. 2.6).

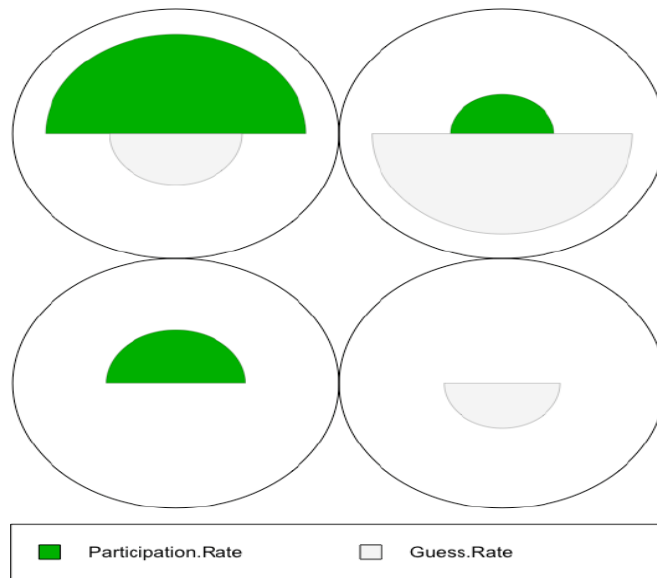


Фиг. 2.5 Грешка допусната от мрежата



Фиг. 2.6 Брой епохи

Извършено е изследване на възможностите за класифициране на потребителския вот при прогнозиране на финансови времеви редове. При разработването на система за събиране на потребителски вот, от съществено значение е класификацията на събраните данни. За да може гласът на потребителите да се използва за бъдещо прогнозиране, събраната информация трябва да бъде класифицирана според честота на гласуване за един потребител и процент на успех на всеки подаден глас. Тази задача ефективно е решена със самоорганизиращи се карти на Кохонен. Постигнатите резултати (Фиг. 2.7) са представени в (Томов-03). В публикация (Томов-03) авторът на настоящия дисертационен труд има 1/3 принос, който се състои в предлагането на представената идея и написването на програмния код за извършване на експериментите, поради което е и водещ автор в публикацията.



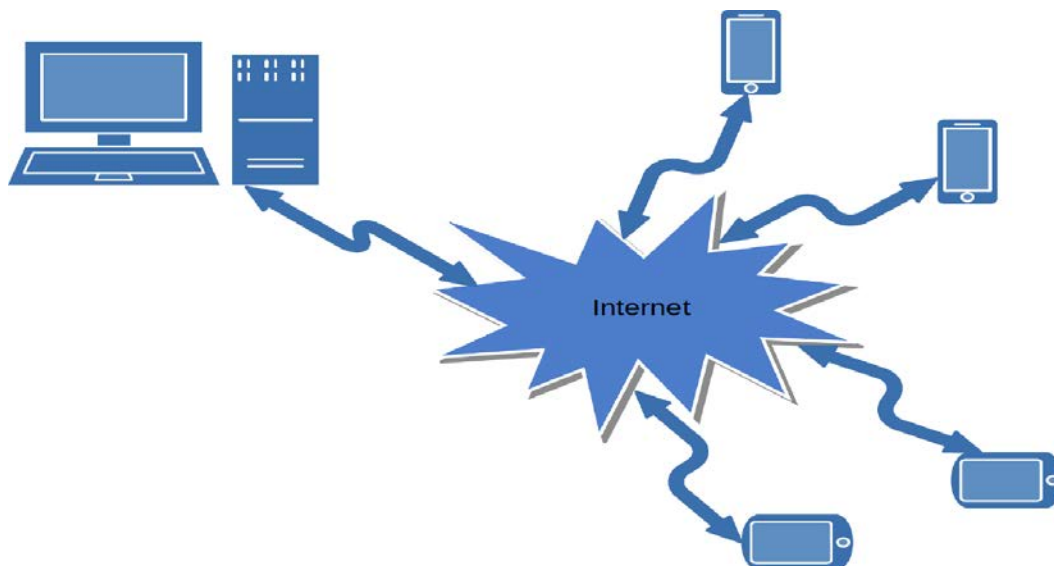
Фиг. 2.7 Четири групи по честота на участие и ниво на познаване

### Основни изводи:

- а) Предложените подобрения в операцията за селекция в генетичните алгоритми може да подобри търсенето на субоптимални решения, макар и това да е за сметка на изчислителното време;
- б) Обобщаващите възможности на синусоидална апроксимация дават достатъчно основания този инструмент да намери приложение в практическото прогнозиране на финансови времеви редове;
- в) Бързи прототипи на изкуствени невронни мрежи са възможни с наличните инструменти за оптимизация в софтуерни пакети за електронни таблици;
- г) Алтернативи на производните в изкуствените невронни мрежи могат да доведат до ускорение на процеса по обучение;
- д) Бавно изчисляваните целеви функции значително забавят процеса по търсене на субоптимални решения;
- е) Класификацията на потребителския вот при човек-компютър разпределените изчисления е ключов компонент за генериране на прогнози.

### Глава 3. Софтуерна система за прогнозиране с ИНМ на времеви редове

В трета глава е представена архитектура (Фиг. 3.1) и софтуерна реализация на разпределена система в мобилни устройства за прогнозиране.



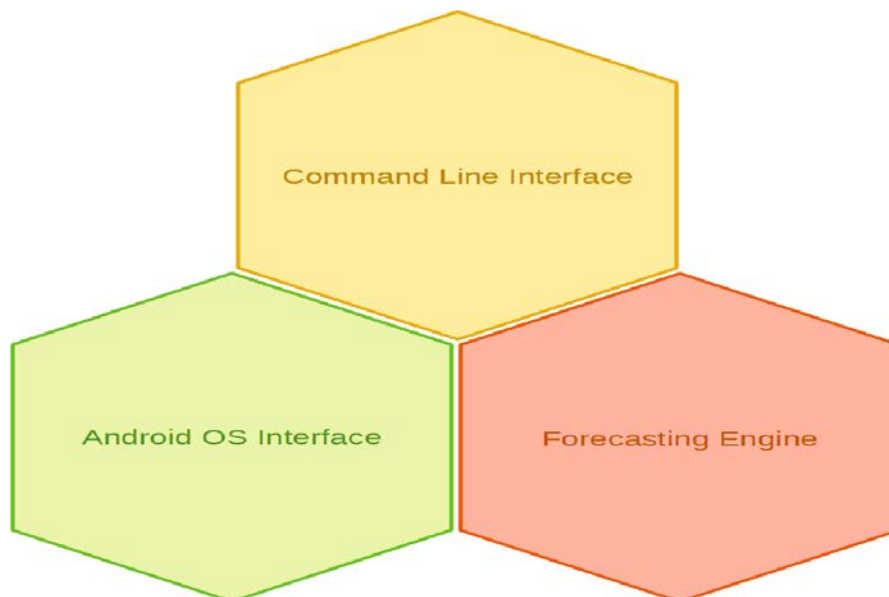
Фиг. 3.1 Архитектура на системата

Извършена е разработка на софтуерно решение за мобилни устройства, под операционната система Android OS (Фиг. 3.2).



Фиг. 3.2 Мобилно приложение

Разработеният програмен код е представен като подсистема от тип клиент-сървър. От своя страна, мобилното приложение е представено с модулна архитектура (Фиг. 3.3) за максимална конфигурируемост.



Фиг. 3.3 Модулна организация

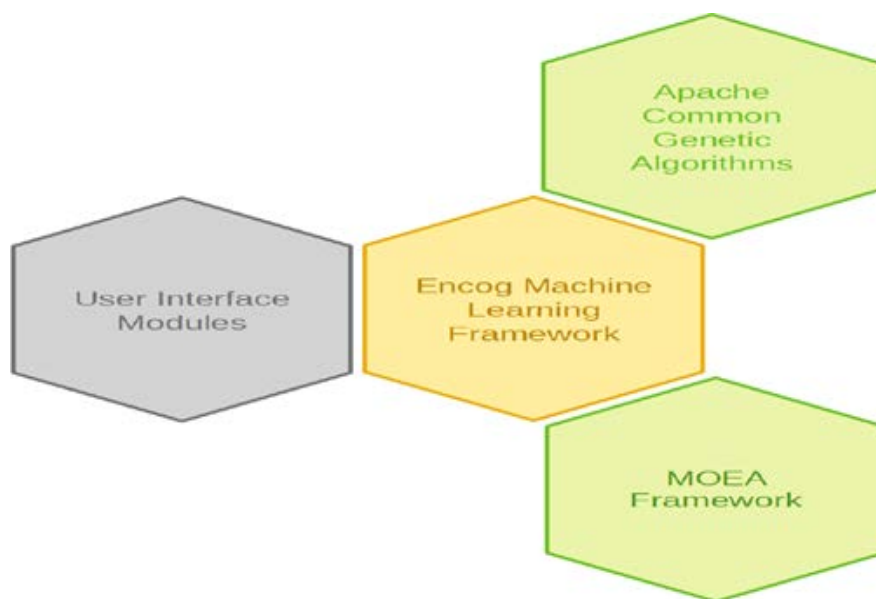
Направено е представяне и на разработения графичен потребителски интерфейс (Фиг. 3.4).



Фиг. 3.4 Графичния потребителски интерфейс

Потребителят има възможност да види валутната двойка, за която се е извършено прогнозирането, процеса на обучение на ИНМ и резултатът (прогнозната стойност) от обучената невронна мрежа. Интерфейсът позволява и събиране на субективното мнение на потребителя за това, как очаква да се

промени цената на съответната валутна двойка. Представени са външните програмни библиотеки, включени в процесите по пресмятането на прогнозите (Фиг. 3.5).



Фиг. 3.5 Външни програмни библиотеки

Получените резултати са представени в (Tomov-05, Tomov-06, Tomov-07, Zankinski-02). В публикация (Tomov-05) авторът на настоящия дисертационен труд има 1/3 принос, който се състои в предлагането на представената идея и написването на програмния код за извършване на експериментите, поради което е и водещ автор в публикацията. В публикация (Tomov-06) авторът на настоящия дисертационен труд има 1/3 принос, който се състои в предлагането на представената идея и написването на програмния код за извършване на експериментите, поради което е и водещ автор в публикацията. В публикация (Tomov-07) авторът на настоящия дисертационен труд има 1/3 принос, който се състои в предлагането на представената идея и написването на програмния код за извършване на експериментите, поради което е и водещ автор в публикацията. В публикация (Zankinski-02) авторът на настоящия дисертационен труд има 1/3 принос, който се състои в написването на програмния код за извършване на експериментите.

### **Основни изводи:**

а) Архитектурата за разпределени изчисления с мобилни устройства може да бъде изключително ефективна в решаването на практически задачи;

б) Модулната организация на софтуера в мобилните приложения дава висока степен на гъвкавост при решаването на технологичните задачи;

в) Графичният потребителски интерфейс е ключов за удовлетвореността на потребителя, при участие в проекти с дарена изчислителна мощност;

г) Ефективното разделяне на модулите за пресмятане от модулите за графичния потребителски интерфейс дават възможност за ефективен контрол по качеството;

д) Употребата на софтуерни библиотеки с отворен код значително скъсяват времето за производство на софтуера и подобряват качеството, разчитайки на активната общност по поддръжката на софтуерните библиотеки.

## **Глава 4. Числени тестове на алгоритмите в системата за прогнозиране**

В четвърта глава е изпълнен сравнителен анализ на подбрани точни числени и евристични методи за обучение на изкуствени невронни мрежи. Като входни данни са използвани базова форма на времеви ред, следващ синус функция и сложна форма на времеви ред от цената на дигиталната валута биткойн.

Тестваните точни числени алгоритми са:

- Backpropagation;
- ResilientPropagation;
- QuickPropagation;
- ScaledConjugateGradient;
- ManhattanPropagation.

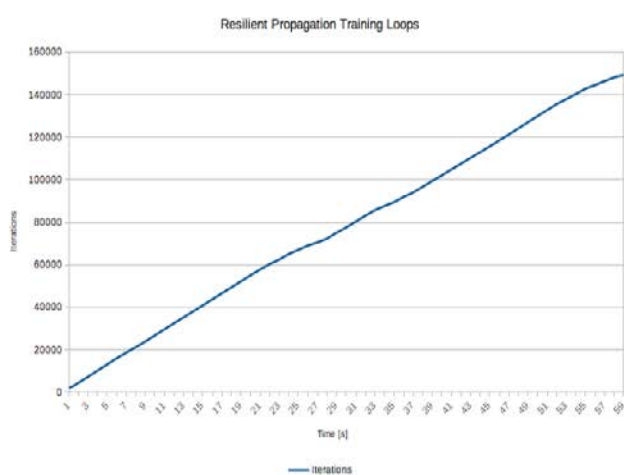


Тестваните евристични алгоритми са:

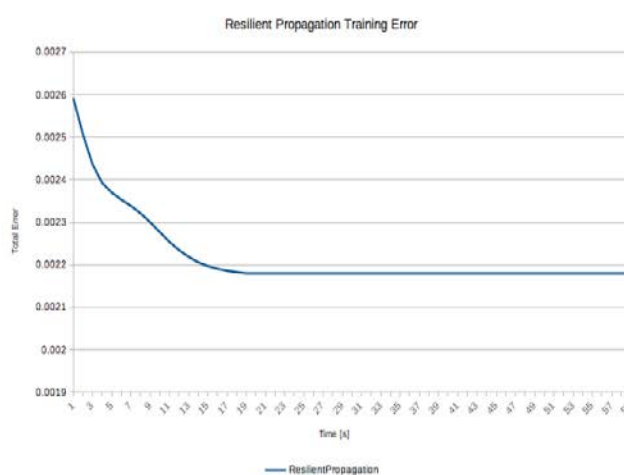
- Evolution Strategy;
- Genetic Algorithm;
- Differential Evolution.

За всеки един алгоритъм е направена графично представяне на броя тренировъчни цикли и общата допусната грешка от ИНМ.

При точните числени методи ясно се откроява алгоритъма за обучение с устойчиво разпространение на грешката (Фиг. 4.1).



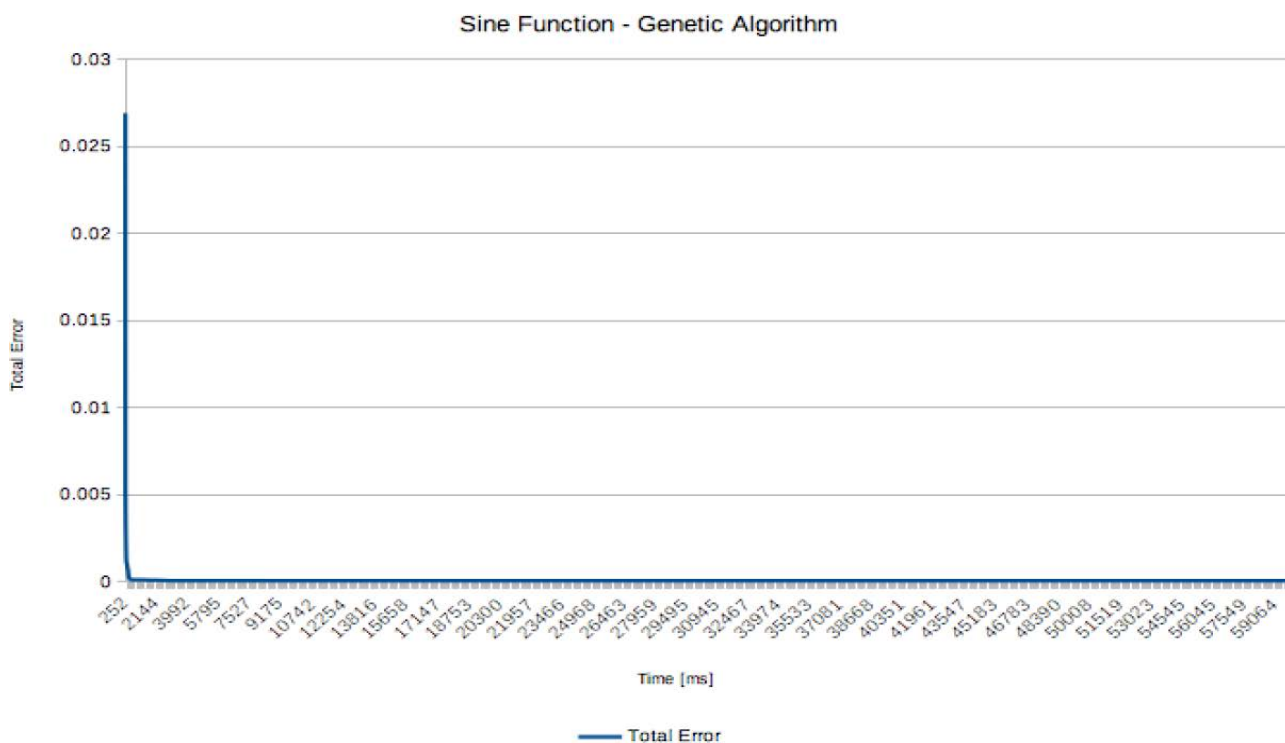
(а) Брой тренировъчни цикли



(б) Обща грешка допусната от ИНМ

Фиг. 4.1 Устойчиво обратно разпространение на грешката - Resilient Propagation

При евристичните методи добри резултати показват генетичните алгоритми (Фиг. 4.2) и еволюционната стратегия. Получените резултати са представени в (Tomov-08).



Фиг. 4.2 Ефективност на генетичните алгоритми

**Основни изводи:**

а) Точните числени методи изключително ефективно се комбинират със стохастичните оптимизационни алгоритми, при обучението на изкуствени невронни мрежи;

б) Отвореният формат по който са организирани списъка от точни и стохастични алгоритми дава възможност за бързо и ефективно разширяване на този списък от алгоритми.

**Заключение – резюме на получените резултати**

Получените резултати, описани в настоящия дисертационен труд, могат да се обобщят в следните научни и научно-приложни приноси/резултати:

1. Направен е обзорен анализ и класификация на алгоритмите за обучение на изкуствени невронни мрежи от тип многослоен перцептрон. Разгледани са най-използваните начини за прогнозиране на времеви

редове и по какъв начин машинното самообучение се прилага в тази проблемна област. Установено е, че алгоритъмът с обратно разпространение на грешката, който е от групата на точните числени, градиентни алгоритми, е най-често използвания за обучение на изкуствени невронни мрежи. Установено е също така, че този алгоритъмът много добре се допълва с евристичните, еволюционни алгоритми за глобална оптимизация, които от своя страна се поддават на изключително висока степен за паралелна обработка;

2. За целите на процеса на обучение на ИНМ, при определяне на теглата, е предложено да се използва генетичен алгоритъм, който разчита на операциите като селекция, кръстосване и мутация. Поради това е предложен нов оператор за селекция, основан на създаването на поколения при процедура за рекурсивно спускане, което осигурява търсеното бързодействие на използваните евристични алгоритми;
3. Инкременталната апроксимация на времевите редове най-често се реализира от уравнение на права и ред от синус функции. За постигане на по-добро апроксимиране, е предложен е подход за пресмятане на коефициентите на синус функциите с оптимизатор, базиран на еволюция на разликите и рояк от частици;
4. Предложена е алтернатива на производна за активационната функция в изкуствени невронни мрежи. Получените резултати показват по-добро бързодействие и допусната грешка в полза на предложената алтернативна функция отколкото при използването на първа производна на периодична затихваща активационна функция;
5. Предложен е генетичен алгоритъм за обучение на изкуствени невронни мрежи от тип многослоен перцептрон в разпределена среда, което прави възможно използването му при паралелна обработка;
6. Предложена е софтуерна архитектура, позволяваща реализиране на

мобилни разпределени изчисления, базираща се на предложените хибридни алгоритми. Програмната реализация за хибридно използване на градиентни числени и евристични алгоритми за оптимизация на теглата в изкуствени невронни мрежи е реализирана в мобилно приложение за Android.

## **Насоки за бъдещи изследвания**

Постигнатото в операционната система Android би могло да бъде сходна цел за постигане в операционната система iOS, на компанията Apple. За разлика от Android, iOS е изцяло затворена операционна система. Моделът за разпространение на приложения под iOS също би довел до допълнителни затруднения. Друга насока за развитие на идеите от дисертационния труд е ориентирана към операционната система KaiOS. Тази операционна система все още няма голямо разпространение и е насочена предимно към по-маломощни мобилни устройства, но може да се окаже изключително продуктивна посока за допълнителни научни изследвания.

По отношение на използваните алгоритми и софтуерни библиотеки, съществуват множество възможности за подобряване на наличните алгоритми и добавяне на нови такива. Използваните софтуерни библиотеки са с отворен код, което дава огромна свобода за изследване на програмния код, неговото дописване и оптимизиране, както и разширяването му с нови алгоритми.

Някои от областите с потенциално приложение на изкуствените невронни мрежи са управление на автономни системи, прогнозиране на работното натоварване на служители, прогнозиране на присъствието на служителите в офиса, при извършване на преброяване на населението и др. Към някои от тези потенциални приложения са насочени и част от бъдещите изследвания.

## Апробация на резултатите и публикации

Основните резултати, получени при разработката на дисертационната работа, са докладвани в единадесет публикации на специализирани журналы, национални и международни конференции:

1. Mateeva, G., Tomov, P., Parvanov, D., Petrov, P., Kostadinov, G., Balabanov, T.: Some Capabilities of Android OS for Distributed Computing. Proceedings of Big Data, Knowledge and Control Systems Engineering BdKCSE'21, 2021, 1-6, ISBN 978-1-6654-1043-4.
2. Zankinski, I., Barova, M., Tomov, P.: Hybrid Approach Based on Combination of Backpropagation and Evolutionary Algorithms for Artificial Neural Networks Training by Using Mobile Devices in Distributed Computing Environment. Proceedings of 11th International Conference on Large-Scale Scientific Computations LSSC'17, June 5-9, 2017, Sozopol, Bulgaria, 2017, 425-434, ISBN 978-3-319-73440-8.
3. Tomov, P.: Encog Gradient Training Algorithms Evaluation. Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 77, 2021, 11-19, ISSN 2738-7356.
4. Tomov, P.: Multilayer Perceptron Fast Prototyping with Differential Evolution and Particle Swarm Optimization in LibreOffice Calc. Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 75, 2021, 5-14, ISSN 2738-7356.
5. Tomov, P., Zankinski, I., Balabanov, T.: Training of Artificial Neural Networks for Financial Time Series Forecasting in Android Service and Widgets. Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, no. 71, Institute of Information and Communication Technologies - Bulgarian Academy of Sciences, 2019, 50-56, ISSN 1314-409X.
6. Tomov, P., Zankinski, I., Balabanov, T.: Server Side Vote Clustering in Human-Computer Distributed Computing. Information Technologies and Control, no. 2, John Atanasoff Society of Automatics and Informatics, 2019, 15-19, ISSN 2367-5357.
7. Tomov, P., Zankinski, I., Barova, M.: Artificial Neural Networks Time Series Forecasting with Android Live Wallpaper Technology. Proceedings of the International Conference Numerical Methods for Scientific Computations and Advanced Applications NMSCAA'18, May 28-31, 2018, Hissarya, Fastumprint, 2018, 76-79, ISBN 978-954-91700-7-8.
8. Tomov, P., Zankinski, I., Barova, M.: Mobile Alternative of the Moneybee Project For Financial Forecasting. Proceedings of the Annual University Scientific Conference of the National Military University Vasil Levski, June 14-15, 2018, Veliko Tarnovo, Innovation and Sustainability Academy – ISA, 2018, 1085-1089, ISSN 2367-7481.

9. Tomov, P., Monov, V.: Modeling and Analysis of Time Series. Proceedings of International Scientific Conference UniTech'17, Gabrovo, November 17-18, 2017, vol. II, University publishing house Vasil Aprilov, 2017, 404-409, ISSN 1313-230X.
10. Tomov, P., Monov, V.: Artificial Neural Networks and Differential Evolution Used for Time Series Forecasting in Distributed Environment. Proceedings of the International Conference Automatics and informatics, October 4-5, 2016, Sofia, Bulgaria, Federation of the scientific engineering unions, John Atanasoff Society of Automatics and Informatics, 2016, 129-132, ISSN 1313-1850.
11. Keremedchiev, D., Barova, M., Tomov, P.: Mobile Application as Distributed Computing System for Artificial Neural Networks Training Used in Perfect Information Games, International Scientific Conference UniTech'16, Gabrovo, University publishing house Vasil Aprilov, 2016, 389-393, ISSN 1313-230X.

Резултатите, постигнати в дисертационния труд са отличени с награда в състезание за глобална скалируема оптимизация, провело се като част от Международната конференция за високопроизводителни изчисления, 2019 година.

## **Декларация за оригиналност на резултатите**

Декларирам, че настоящата дисертация съдържа оригинални резултати, получени при проведени от мен научни изследвания, с подкрепата и съдействието на научния ми ръководител. Резултатите, които са получени, описани и/или публикувани от други учени, са надлежно и подробно цитирани в библиографията.

Настоящата дисертация не е прилагана за придобиване на научна степен в друго висше училище, университет или научен институт.

Подпис: .....

## **Благодарности**

Изказвам своята искрена признателност и благодарност на научния си ръководител проф. д-р Владимир Монов и на проф. д.н. Даниела Борисова, за ценни напътствия, професионална компетентност и съдействие при подготовката на дисертационния труд.

Благодаря на колегите гл. ас. д-р Тодор Балабанов и инж. Илиян Занкински, с които работим заедно в голяма част от научните изследвания, за оказаната помощ и съдействие.

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [Tomov-01] Tomov, P., Zankinski, I., Balabanov, T.: Genetic algorithm selection operator based on recursion and Brute-Force. Proceedings of 14th Annual Meeting of the Bulgarian Section of SIAM, 93--93, (2019). ISSN 1313-3357
- [Tomov-02] Tomov, P., Zankinski, I., Danev, V.: Local Search, Brute-Force and Recursion for Selection Operator. Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 74, 24--32, (2020). ISSN 2738-7364 DOI 10.7546/PECR.74.20.03
- [Tomov-03] Tomov, P., Zankinski, I., Balabanov, T.: Server Side Vote Clustering in Human-Computer Distributed Computing. Information Technologies Control, vol. 2, no. 3, 15--19, (2019). ISSN 2367-5357 DOI 10.7546/itc-2019-0008
- [Tomov-04] Tomov, P.: Multilayer Perceptron Fast Prototyping with Differential Evolution and Particle Swarm Optimization in LibreOffice Calc. Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 75, 5--14, (2021). ISSN 2738-7356 DOI 10.7546/PECR.75.21.02
- [Tomov-05] Tomov, P., Zankinski, I., Barova, M.: Mobile Alternative of the Moneybee Project For Financial Forecasting. Proceedings of the Annual University Scientific Conference of the National Military University Vasil Levski, 1085--1089, (2018). ISSN 2367-7481
- [Tomov-06] Tomov, P., Zankinski, I., Barova, M.: Artificial Neural Networks Time Series Forecasting with Android Live Wallpaper Technology. Proceedings of the International Conference Numerical Methods for Scientific Computations and Advanced Applications, 76--79, (2018). ISBN 978-954-91700-7-8
- [Tomov-07] Tomov, P., Zankinski, I., Balabanov, T.: Training of Artificial Neural Networks for Financial Time Series Forecasting in Android Service and Widgets. Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 71, 50--56, (2019). ISSN 1314-409X
- [Tomov-08] Tomov, P.: Encog Gradient Training Algorithms Evaluation. Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 77, 11--19, (2021). ISSN 2738-7356 DOI 10.7546/PECR.77.21.02



- [Velichkova-01] Velichkova, V., Tomov, P., Balabanov, T.: Incremental Sinusoidal Approximation of Time Series with LibreOffice Calc Solver. Problems of Engineering Cybernetics and Robotics, vol. 75, 43--50, (2021). ISSN 2738-7364 DOI 10.7546/PECR.75.21.05
- [Zankinski-02] Zankinski, I., Barova, M., Tomov, P.: Hybrid Approach Based on Combination of Backpropagation and Evolutionary Algorithms for Artificial Neural Networks Training by Using Mobile Devices in Distributed Computing Environment. Proceedings of 11th International Conference on Large-Scale Scientific Computations, 425--434, (2017). ISBN 978-3-319-73440-8 DOI 10.1007/978-3-319-73441-5