



# Рецензия

от доц. д-р Мила Илиева ИЛИЕВА – ОБРЕТЕНОВА

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“

относно дисертационен труд

за придобиване на образователната и научна степен „Доктор“ в област на висше

образование: 5. „Технически науки“ Професионално направление: 5.2.

„Електротехника, електроника и автоматика“

Научна специалност: „Приложение на принципите и методите на кибернетиката в различни области на науката“

(02.21.10)

Тема на дисертационния труд:

## МАТЕМАТИЧЕСКИ МЕТОДИ ЗА ИЗСЛЕДВАНЕ, МОДЕЛИРАНЕ, АНАЛИЗ И ПРОГНОЗИРАНЕ В ЕНЕРГЕТИКАТА И ЕНЕРГИЙНИТЕ ПАЗАРИ

Автор на дисертационния труд: магистър инж. Екатерина Поповска

Научен консултант: доц. д-р инж. Галя Георгиева - Цанева

### 1. Общи положения и биографични данни

Маг. инж. Екатерина Поповска през 2013г. е завършила висшето си образование в Университет "Св. Кирил и Методий", Факултет по Електротехника и Информационни Технологии, Скопие, Македония като магистър по Електротехника и Информационни Технологии. От 2019г. е докторант към секция Медицинска роботика на ИР-БАН, като от 01.12.2023г. е зачислена към ИР-БАН като изследовател. През последното десетилетие маг. инж. Поповска е заемала редица отговорни постове, като ефективно е съчетавала техническите си умения и управленски качества. Тя е заемала и позицията на Ръководител на отдел "Планиране на Производството и Продажби" в АЕЦ Козлодуй. Преди това маг. инж. Поповска е заемала ключова роля като Ръководител на отдела "Регулации, Мониторинг и Анализ" в Независима българска енергийна борса, както и старши експерт към Комисията за енергийно и водно регулиране. Оттогава тя проявява активен интерес и участие в научни изследвания в различни области, свързани с енергетиката и енергийните пазари. Маг. инж. Поповска също така е изпълнявала ролята на Лектор в програмата "Енергийни Пазари и Услуги" към Центъра за образователни услуги (ЦОУ) на Стопанския факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“ и Списание „Ютилитис“. Тя е преподавала въпроси, свързани с много данни (Big Data), анализ на възможности за манипулация на енергийния пазар, фундаментален и технически анализ на пазара на електроенергия, методи на изкуствен интелект за анализ и прогнозиране на цените на електроенергията в България.

### 2. Общо описание на представените материали

Като член на журито съм получила:

1. Заповед №21а от 24.01.2023г. на Директора на Институт по Роботика-БАН.
2. Професионална автобиография по европейски образец
3. Диплома за завършено висше образование
4. Списък на публикациите по темата на дисертацията
5. Копия на публикациите по темата на дисертацията
6. Списък на забелязани цитирания
7. Приноси
8. Декларация за оригиналност
9. Справка за изпити и получени кредити
10. Заповед за зачисляване в докторантura
11. Автореферат
12. Дисертация

### **3. Актуалност, цел и задачи**

Дисертационният труд се фокусира върху актуални и значими аспекти от областта на енергетиката, като изследва методи за оценка и прогнозиране на цените на електроенергията. Актуалността на проблема е детайлно разгледана, като се подчертава нарастващето на несигурността в цените, породена от интеграцията на възобновяеми източници и интелигентни мрежи.

Целта на дисертационния труд е да се разработи ефективна методология и алгоритми за прогнозиране на цените на електроенергията на борсовия пазар със специфичен фокус върху периода "Ден напред". Този аспект на целта създава необходимостта от изследване и анализ на различни методи за оценка на движението на цените.

За реализацията на поставената цел дисертацията формулира 4 ключови задачи, които последователно са решени в дисертационния труд. Първата задача включва разработването на методика за изследване и анализ на данните за цените на електроенергията, като се подчертава важността на подбора на методи за анализ на реални дългосрочни данни в зависимост от условията на енергийния пазар. Втората задача се фокусира върху изследването на данни за краткосрочни борсови цени на електроенергията и използването на техники за подобряване на енергийното прогнозиране. Третата задача включва създаването на софтуерни процедури за анализ, симулация и прогнозиране, а четвъртата задача цели определянето на най-ефективните симулационни модели за прогнозиране.

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

Обемът на дисертацията е 183 страници и съдържа увод, 4 глави, заключение, приноси, списък на използваната литература, 9 таблици и 37 фигури. Библиографската справка съдържа 139 заглавия, от които всички на латиница и 2 адреса в интернет. Приложението са оформени на 22 страници, включващи списък със забелязани цитирания и кодове на софтуерни програми.

Глава 1 включва литературен обзор, който е обширен и обхваща различни методи за прогнозиране и анализ на цените на електроенергията. В тази глава са представени новости и тенденции в развитието на методите за прогнозиране на времеви серии от цени на електроенергия. Проучването обхваща научни статии и изследвания от водещи световни и български автори. Анализирани са различни методи на научното познание, включително функционирането на системи, представени чрез модели, разработени чрез методите на имитационното моделиране. Главата обхваща методите както за краткосрочната, така и за дългосрочната времева устойчивост, концепциите и методите за тях, с акцент върху приложението и моделирането в сложни енергийни системи.

В Глава 2 е направен анализ на методите за дългосрочна устойчивост. Анализът на дългосрочната устойчивост се извършва чрез фрактален анализ и метода на флукутуационен анализ. В тази глава е разгледана методологията за изследване на дългосрочната устойчивост на времеви серии, фокусрайки се върху борсовите цени на електроенергия. Представен е и алгоритъм за реализация на R/S метода, като са подчертани основните стъпки. След това е представен методът на флукутуационен анализ с елиминиране на хода (DFA), който служи за изследване на дългосрочните корелации във времеви редове. Обяснени са основните стъпки на DFA метода, включително процеса на отклонение и изчисляване на флукутации. Представен е и нов алгоритъм за изчисление на експонентата на Хърст чрез прилагане на DFA. В последната част на главата е създадена методика за прогнозиране на цените на електроенергията в дългосрочен план. Описани са шест стъпки, включително събиране на данни, избор на

модел, предварителна подготовка на данните, валидация на модела, прогнозиране и оценка. Този подход може да бъде приложен както към R/S, така и към DFA метода. В заключение са представени изводите от изследванията, като се обобщава, че R/S методът и DFA методът се използват успешно за анализ на дългосрочната устойчивост на цените на електроенергията. При сравнение между тях, DFA методът показва по-малка относителна грешка и се счита за по-точен, което го прави подходящ за изследване на Хърст експонентата във времевите редове.

В глава 3 е представен комплексен подход за изследване и прогнозиране на цените на електроенергия чрез използване на два различни метода: SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average) и LSTM (Long Short-Term Memory) чрез програмния език Python. Първоначално е разгледан методът SARIMA, който е подходящ за анализ и прогнозиране на стойности върху времеви редове със сезонни ефекти, тенденции и шумове. Работата демонстрира, че SARIMA е ефективен метод за прогнозиране на цените на електроенергия в случаи, когато сезонността има съществено значение. В следващата част от главата е представен алгоритъм, основан на модел на рекурентна невронна мрежа с голяма краткосрочна памет (LSTM). Този алгоритъм представлява автоматизиран процес, който се фокусира върху обработката и анализа на времеви редове, постигайки висока точност в прогнозирането на бъдещите цени на електроенергия. Важно е да се отбележи, че LSTM се оценява като подходящ метод, особено за краткосрочни прогнози и за почасови или по-чести времеви интервали. Методиката за изследване, представена в главата, обединява обработка на данни, анализ на времеви редове и прогнозиране, включвайки етапи като предварителна обработка на данни, създаване на модели и тестване на тяхната ефективност. Работата набляга на важността на избора на подходящ метод според характеристиките на данните, като например сезонността, което е видно чрез успешното приложение на SARIMA при наличие на сезонни влияния върху цените на електроенергията. В обобщение, Глава Трета представя аналитичен процес, който цели ефективното прогнозиране на краткосрочната динамика на борсовите цени на електроенергия, като включва разнообразни методи и стъпки за подготовка, моделиране и оценка.

В глава 4 на дисертацията се представя прецизно отчитане на данните, последвано от задълбочен анализ на резултатите, произтичащи от емпиричното изследване в областта на прогнозирането на цените на електроенергията. Подробният анализ и обобщение на получените резултати от фракталния анализ, моделите ARIMA и рекурентната невронна мрежа допринасят за разбиране на характеристиките на времевите серии на цените на електроенергията. Главата обхваща разнообразни методи и модели, които се използват с цел оптимизация на прогнозните процеси в енергийния сектор. Различните модели и техните резултати са представени отчетливо и ясно.

Първоначалното разглеждане е насочено към LSTM и ARIMA методите, като се анализират почасови и дневни времеви редове. Резултатите показват, че LSTM е ефективен за краткосрочни прогнози, особено при почасовите данни, където точността е висока. Въпреки това, при дългосрочните прогнози за цените на електроенергията, методът се сблъска с предизвикателства поради нестабилността на енергийните пазари. След това, главата преминава към сравнителен анализ на четири различни метода за прогнозиране: методите на Хърст и DFA, ARIMA (Авторегресивен Интегриран Модел) и LSTM. В изследването се подчертава, че Хърст и DFA предоставят полезна информация за корелациите и тенденциите във времевите редове на цените на електроенергията. Същевременно, ARIMA се сблъска с ограничения при сезонни времеви редове, докато LSTM се отличава с по-голяма точност при краткосрочни прогнози.

## **5. Приноси**

Приемам всички приноси на докторанта, а именно:

### Научно-приложни приноси

1. Създадена е методика за изследване, анализ и прогнозиране на цените на електроенергията, базирана на ARIMA, SARIMA и LSTM методи, които дават оптимални прогнози за цените на пазара на електроенергия в зависимост от различните входни фактори.
2. Създадена е методика за изследване и анализ на дългосрочната устойчивост на времевите серии от данни на борсови цени на електроенергия базирана на метода DFA, което не е правено досега.
3. Експериментално е изследвано приложението на статистически методи за определяне на експонентата на Хърст (R/S метод) върху цените на електроенергията. Изследванията показват максимална относителна грешка 6% при изчисляване на  $H$ , където  $H$  е оценка на експонентата на Хърст, което показва приложимостта на този метод за проучване на фракталността на времевите серии на цените на електроенергията.
4. Експериментално е доказано, че DFA метода е по-подходящ при прогнозиране на дългосрочни данни за цената на електроенергията в сравнение с R/S метода. Направеният сравнителен анализ показва максимална относителна грешка при определяне на експонентата на Хърст 1.2% при прилагане на DFA срещу 6% при реализация с R/S статистически метод.
5. При анализа на краткосрочните данни е доказано преимуществото на прогнозирането с помощта на SARIMA метода (в сравнение с ARIMA метода), тъй като променливия характер на цените на електроенергията показва сезонност.

### Приложни приноси:

1. Програмно реализирани и анализирани са алгоритми за анализ и прогнозиране на дългосрочни данни за цените на електроенергията на базата на прилагане на R/S метода за определяне на експонентата на Хърст и DFA метода.
2. Програмно реализирани и анализирани са алгоритми за анализ и прогнозиране на краткосрочни данни за цените на електроенергията на базата на прилагане на методите ARIMA, SARIMA и LSTM.
3. Създадени са демонстрационни процедури за анализ и прогнозиране на цените на енергетиката в зависимост от вида на зададените входни параметри.

Считам, че приносите са повече от достатъчни като качество и количество и са защитени с публикации в престижни издания.

## **6. Автореферат и публикации по дисертационния труд**

Представеният автореферат представя достоверно съдържанието на дисертационния труд и съответства на изискванията на ЗРАСРБ и ГП ЗРАСРБ.

Справката за необходимите кредити по дисертационния труд показва, че при изискуем минимум от 250, докторантът е съbral **450 кредити**.

Много добро впечатление правят броя и качеството на публикациите на маг. инж. Поповска, свързани с дисертацията. Те са 6 на брой, като 2 от тях са с SJR.

## **7. Мнение, препоръки, забележки**

Дисертационният труд е изключително добре структуриран и предоставя ясен и обстоен анализ на математическите методи, използвани за изследване, моделиране, анализ и прогнозиране в областта на енергетиката и енергийните пазари. Резултатите и заключенията са изложени систематично и компетентно. Съдържанието на дисертацията

отговаря на всички изисквания за придобиване на образователна и научна степен (ОНС) „доктор“.

Основните предизвикателства, които се изправят пред изследваните математически методи в контекста на енергийните пазари, са успешно идентифицирани. В работата се подчертава важността на математическите модели за разглеждане на сложността на съвременните енергийни системи. Авторът успешно обосновава използването на различни методи, като R/S анализ, DFA, ARIMA, и LSTM, за анализ и прогнозиране на времеви редове на цените на електроенергията. Разнообразните подходи представлят обширен обзор на същността и приложението на изследваните методи. Отделните методи се използват в контекста на времеви хоризонти и сезони, като резултатите се анализират в детайли. Работата е съсредоточена върху краткосрочни и дългосрочни прогнози, като се разглеждат предимствата и ограниченията на всяка методология. Изводите от изследването са четири и подчертават възможността за подобреие на прогнозната точност чрез избор на подходящ метод за конкретните условия. Заключението обобщава постигнатите резултати и осигурява синтез на направените научни и приложни приноси. Работата предоставя ясни препоръки за използване на различни методи в зависимост от времевите хоризонти и характеристиките на данните.

Препоръчвам дисертационния труд като значим и актуален принос към науката. Работата предлага обширен обзор на различни математически методи и тяхната приложимост, което я прави ценен източник за учени и практици в сферата на енергетиката и финансите. Авторът демонстрира високо ниво на експертиза и изключително добро разбиране на темата. Дисертацията представя високо качество на изследването, ясна методология и отлично представяне на резултатите. Тя е ценен принос към областта и заслужава вниманието на научната общност.

Въпреки успешните резултати, дисертацията изрично признава своите ограничения, свързани с допусканията в моделите и ограниченията на данните. Авторът предлага идеи за бъдещи изследвания, включително разширяване на методите и моделите, използване на по-обширни данни и постоянно подобряване на аналитичните инструменти за ефективно прогнозиране на електроенергийните пазари.

## **8. Заключение с ясна положителна или отрицателна оценка на дисертационния труд**

В дисертационния труд са получени резултати с научно-приложен и приложен характер, които представляват оригинален принос в науката, публикувани са вrenomирани специализирани научни издания и представени на престижни международни научни форуми.

Дисертационният труд на маг. инж. Поповска отговаря на изискванията на Закона за развитието на академичния състав в Република България, Правилника за прилагането му, Правилника на БАН, както и на Правилника за развитие на академичния състав на Институт по роботика към БАН за придобиване на образователната и научна степен „доктор“. Въз основа на направления анализ давам положителна оценка на представения дисертационен труд, с което предлагам Научното жури да присъди образователната и научна степен „доктор“ на маг. инж. Екатерина Поповска в област на висше образование: 5. „Технически науки“, Професионално направление: 5.2. „Електротехника, електроника и автоматика“, Научна специалност: (02.21.10) „Приложение на принципите и методите на кибернетиката в различни области на науката“.