

РЕЦЕНЗИЯ

върху дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен „Доктор“ в област на висше образование „Технически науки“, професионално направление 5.2 „Електротехника, електроника и автоматика“, научна специалност „Електрически мрежи и системи“

Автор на дисертационния труд: маг. инж. Таньо Иванов Танев

Тема на дисертационния труд: „ИЗСЛЕДВАНЕ НА РЕЖИМИТЕ НА РАБОТА НА ФОТОВОЛТАИЧНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ЦЕНТРАЛИ ”

Научен ръководител: доц. д-р инж. Рад Христов Станев

Рецензент: проф. д-р инж. Ангел Белчев Цолов, ТУ-София, Катедра Електроенергетика

1. Актуалност на разработвания в дисертационния труд проблем в научно и научно-приложно отношение. Степен и нива на актуалността на проблема и конкретните задачи, разработени в дисертацията.

Според динамиката и характера на промените в ЕЕС на Р. България през последните години и стратегиите заложи в European SET Plan темата на дисертационния труд е актуална. Въвеждат се в експлоатация източници на електроенергия с относително случаен режим на генерация, присъединени в различните нива от йерархията на системата, без перспективно планиране и координация. В голяма степен производство им не е подчинено на ЕСО. От друга страна се увеличават изискванията за качество на електрическата енергия. Електроенергийните системи и елементите им вече работят в режими близки до граничните по отношение на надеждността и динамичната устойчивост. Това налага изследвания и разработване на нови технически (и икономически) решения на възникващите проблеми. В дисертационния труд обект на изследване ефекта различни методи за управление на работата на ВЕИ върху установените и преходните режими на ЕЕС като за целта са създадени съответните математически модели. Това налага изследвания и разработване на нови технически (и икономически) решения на възникващите проблеми. Въз основа на това изследване са формулирани целта и задачите на дисертационния труд.

Дисертационният труд е в обем от 233 страници, като включва увод, три глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 209 литературни източници, като всички 209 са на латиница, а пет от тях са интернет адреси. Работата включва общо 41 фигури и 6 броя таблици.

Целта на дисертационния труд е да се изследват режимите на работа на фотоволтаични централи, като се разработят и валидират методологии и алгоритми за математическо моделиране и прогнозиране (на режимите) на съвременните фотоволтаични електрически централи и техните основни елементи..

Изследванията и анализите са разпределени основно в следните задачи:

- Анализ и обобщение на съвременните подходи с методи за машинно обучение за моделиране и прогнозиране на производството на електроенергия от фотоволтаични електроцентрали.
- Математическо моделиране на производството на електроенергия на ФЕЦ чрез моделиране на масив от фотоволтаичните модули.

- Моделиране на производството на електроенергия на ФЕЦ чрез математическо моделиране на ефективността и производителността на ФВ инвертори.
- Моделиране на напрежението в реални работни режими на батерийна система за съхранение на енергия, интегрирана към ФЕЦ.
- Прилагане и сравнение на методи за машинно обучение за прогнозиране на производството на електроенергия на ФЕЦ въз основа на исторически данни на основните, най-значимо влияещи фактори (слънчевата радиация и температура на околната среда).
- Прогнозиране на производството на електроенергия на ФЕЦ, в краткосрочен хоризонт (ден напред), чрез прогнозиране на слънчевата радиация с помощта на времеви серии.
- Анализ на резултатите и извеждане на препоръки относно приложимостта и точността на предложените модели в рамките на различни климатични и експлоатационни условия. Всичко това определя актуалността на изследвания проблем.

Авторът на дисертационния труд е формулирал цели и задачи, които са адекватни и съответстват на изискванията на дисертационен труд за придобиване на образователната и научна степен „Доктор“.

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

Дисертантът познава в отлична степен състоянието на проблематиката и творчески интерпретира литературния материал по нея. След анализ на специализираната литература ясно са дефинирани целта и задачите – разработване на математически модели и програмни средства, даващи по-пълна възможност за точно и надеждно прогнозиране на поведението ФЕЦ при производството на електроенергия в различни времеви хоризонти.

Значителна част от публикациите от използваната литература в дисертационния труд са от последните години и са представени на реномирани международни форуми.

3. Съответствие на избраната методика на изследване и поставената цел и задачи на дисертационния труд с постигнатите приноси.

Внимателният прочит на дисертационния труд убеждава, че разработката е подчинена на следната основна линия - доказване на необходимостта от изследванията, анализ на типичните (традиционни) средства за намиране на решения (предимства и недостатъци при конкретните процеси), дефиниране на изискванията и синтез на нови, нетрадиционни средства за изследване.

Отличното познаване на актуалното състояние на изследваните проблеми, задълбочените познания, свързани с методите за проектиране, анализ и оптимизация на устройствата, позволяват на докторанта да разработи оригинални компютърни модели на устройствата, да подбере и приложи ефективни методи за изследване, както и да апробира получените резултати.

Избраната от докторанта методика на изследване е в съответствие с поставената цел и задачи на дисертационния труд и е позволила те да бъдат постигнати и решени на високо ниво.

4. Кратка аналитична характеристика на естеството и оценка на достоверността на материала, върху който се градят приносите на дисертационния труд

Извършено е задълбочено литературно проучване на текущото състояние на методите за прогностичен анализ, както и на съвременните подходи с методи за машинно обучение за моделиране и прогнозиране на производството на електроенергия от фотоволтаични електроцентрали.

Извършените изследвания показват, че оценката на нововъзникващите технологии, стратегии за контрол и тенденции при разработка на системи за управление са от изключителна важност за определяне на стойностите на параметрите при намирането на нови решения и подобрения.

Изследванията и анализите са разпределени основно в следните седем задачи, свързани с работата на ФЕЦ: Анализ и обобщение на съвременните подходи с методи за машинно обучение за моделиране и прогнозиране на производството на електроенергия от фотоволтаични електроцентрали; Математическо моделиране на производството на електроенергия на ФЕЦ чрез моделиране на масив от фотоволтаичните модули; Моделиране на производството на електроенергия на ФЕЦ чрез математическо моделиране на ефективността и производителността на ФВ инвертори; Моделиране на напрежението в реални работни режими на батерийна система за съхранение на енергия, интегрирана към ФЕЦ; Прилагане и сравнение на методи за машинно обучение за прогнозиране на производството на електроенергия на ФЕЦ въз основа на исторически данни на основните, най-значимо влияещи фактори (слънчевата радиация и температура на околната среда); Прогнозиране на производството на електроенергия на ФЕЦ, в краткосрочен хоризонт (ден напред), чрез прогнозиране на слънчевата радиация с помощта на времеви серии; Анализ на резултатите и извеждане на препоръки относно приложимостта и точността на предложените модели в рамките на различни климатични и експлоатационни условия.

Втора глава е насочена към разработване, реализиране и експериментална валидация на математически модели за описване на режимите на работа на фотоволтаична електроцентрала (ФЕЦ) и нейни ключови елементи. Главата включва три последователни изследвания, практически обособени в отделни части:

- структурен комбиниран модел на ФЕЦ, включващ фотоволтаичен генератор, DC окабеляване и инвертор;
- специализиран модел за ефективност/изходна мощност на мрежов фотоволтаичен инвертор чрез мултилинейна регресия;
- регресионен модел за напрежението на батерийна система за съхранение на електрическа енергия (ССЕЕ), интегрирана към ФЕЦ.

Общата цел на главата е да се демонстрира, че с подходящ баланс между физическо-структурни зависимости и емпирични модели (регресия) може да се постигне практически приложима точност, кратко изчислително време и възможност за настройване към конкретна електроцентрала, използвайки ограничен набор от измерими/достъпни входни параметри.

Трета глава включва три последователни изследвания, а именно:

- моделиране и прогнозиране на производството на електроенергия от фотоволтаични електроцентрали (ФЕЦ);
- моделиране на батерийни системи за съхранение на енергия (БССЕЕ), чрез прилагане на методи за машинно обучение (ML) и дълбоко обучение (DL);
- изследване за прогнозиране на производството на ФЕЦ чрез прогнозиране на слънчевата радиация с времеви редове.

Целта на изследванията е да се оцени приложимостта и точността на различни *'data-driven'* модели при реални експлоатационни условия и да се изследва влиянието на периода на обучение и оптимизацията на хиперпараметрите върху качеството на прогнозите. Много актуално в момента е моделирането на батерийни системи за съхранение на енергия чрез машинно и дълбоко обучение. Резултатите са валидирани и резултатите показват, че моделите, базирани на дървета на решенията, и по-специално CatBoost и хетерогенните

ансамбли, постигат най-ниски стойности на нормализираната средно-квадратична грешка. Установено е, че период на обучение от около 30 дни осигурява най-добър компромис между точност и устойчивост на прогнозата.

Оценявам усилията на инж. Танев да търси комбинации от критерии и модели при решаване на формулираните задачи.

Като обобщение може да се каже, че в дисертационния труд е потърсено и намерено решение или са формулирани изисквания за поставената цел и отделните дефинирани задачи. Направени са изследвания и са формулирани съответните изводи. Избраната методика на изследване съответства в достатъчна степен на поставените цели. Получените резултати са систематизирани в приложение по начин, който осигурява добра база за сравнителен анализ.

Очевидна е научната и научно-приложната стойност на очакваните резултати от разработките в дисертационния труд, както и реалната възможност за прилагането им в практиката. Основните резултати от проведените изследвания са проверени чрез сравнителни софтуерни аналитични и хардуерни експериментални мероприятия.

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

Приносите от разработката са значими.

1. Научно-приложни приноси

- Предложен, реализиран и окачествен е структурен подход за изследване на режимите на работа на фотоволтаична електроцентрала и нейните компоненти посредством набор от детерминистични математически модели. Подходът позволява определяне на режимните параметри чрез представяне на отделните елементи, параметрите им и връзките между тях, пресъздавайки процесите и състоянията, свързани с тях.
- Предложено е и е реализирано математическо моделиране на производството на електроенергия на фотоволтаични електрически централи чрез различни методи за машинно обучение, които не изискват експлицитното познаване на параметрите на елементите и връзките между тях.
- Направени са набор от изследвания, третиращи различни видове и топологии на фотоволтаични електрически централи с и без системи за съхранение на електрическа енергия, посредством различни методи и модификациите им, приложени за различни периоди на обучение. Проведен е сравнителен анализ на приложимостта, качествата и предимствата и недостатъците на отделните методи. Предложено е и е реализирано адаптивно определяне на периода на обучение като са обосновани ползите от този подход.

2. Приложни приноси

- Разработени са софтуерни реализации, които позволяват осъществяване на целта и задачите на изследването по отношение на методите и средствата за моделиране на ФВЦ с цел изследване на режимите им.

Приемам претенциите за приноси. Получените резултати са оригинални и напълно съответстват на изискванията за дисертационен труд за придобиване на образователната и научна степен „Доктор“. Използването им ще е полезно още на този етап.

6. Оценка за степента на личното участие на дисертанта в приносите

Работата на докторанта се характеризира със задълбочено познаване на съвременното състояние на проблемите и значителни постигнати от него резултати. Както се вижда от авторския състав в публикациите, а и от приложенията с резултатите от изследванията, разработка с такъв характер и с такъв обем определено изисква екипна работа. Личните му

приноси се потвърждават и от факта, че от шестте му публикации в четири от тях е на първо място.

Ясно личи че докторантът е усвоил и работи свободно със специфичен математически инструментариум, че се справя със сложни изследователски задачи, като ги решава самостоятелно или в екип.

Всичко това, както и личните ми наблюдения за работата на докторанта, ми дават основание да приема, че представената част от разработката като дисертационен труд и приносите в него са лично дело на кандидата.

7. Преценка на публикациите по дисертационния труд: брой, характер на изданията, в които са отпечатани. Отражение в науката - използване и цитиране от други автори, в други лаборатории, страни и пр.

Основните постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в шест публикации, всички в съавторство. Всички публикации са представени на международни конференции и списания и са видими в IEEE и SCOPUS.

Към дисертацията е приложен списък с шест публикации за периода 2018-2025г. Няма самостоятелна публикация. Всички е са в съавторство с научния ръководител или по-голям колектив. Пет от публикациите са в Electrical Engineering Faculty Conferencs (2 в BulEF, две в SIELA, една в ELMA) и една - в Energies 2025 (Q1).

Не е приложена декларация на докторанта за оригиналност и авторство на приносите в дисертационната му работа.

Отбелязани общо 21 цитирания от други автори.

Всички публикации са свързани с тематиката на дисертационния труд и са видими в SCOPUS. Изборът основно на технически форуми като място на изява гарантира допълнителна колегиална оценка от по-голям брой специалисти.

8. Използване на резултатите от дисертационния труд в научната и социалната практика. Наличие на постигнат пряк икономически ефект и пр. Документи, на които се основава твърдението.

Извършените изследвания, свързани със статистически анализ, компютърно моделиране и оптимизация на режимите на ФЕЦ и системи за съхранение на енергия имат своята практическа приложимост при намирането на нови решения и подобрения при тяхната разработка. Получените резултати биха били полезни при разработване на методи и стратегии за контрол и управление режимите на работа на фотоволтаични електрически централи.

В дисертационния труд са разработени и валидирани методологии за моделиране на елементи от ФЕЦ, както и прогнозиране производството на електроенергия от фотоволтаични електроцентрали, базирани на съвременни методи за машинно и дълбоко обучение. За целите на изследването е използвана структурирана база от реални експлоатационни и метеорологични. Разработени са софтуерни реализации, които позволяват осъществяване на целта и задачите на изследването по отношение на методите и средствата за моделиране на ФВЦ с цел изследване на режимите им.

Използването на получените резултати ще е полезно още на този етап.

9. Оценка на съответствието на автореферата с изискванията за изготвянето му, както и на адекватността на отразяване на основните положения и приносите на дисертационния труд

Авторефератът е в обем от 32 страници и е изготвен съгласно изискванията. В него са показани главните достижения на дисертационния труд. Считаю, че той отразява правилно научните приноси на дисертационния труд.

10. Мнения, препоръки и бележки.

Препоръки:

- От редакционен характер: забелязани проблеми с конвертирането на формулите от принос на информацията в различни текстови редактори. Това води до затруднения при анализа на представения материал;
- Литературният обзор е прекалено обширен - почти 60% от текста. Като се добавят и литературните справки в началото на всяка глава се получава усещането за тавтологичен похват;
- Фактическо валидиране на резултати от прогностичен анализ става след сравняване на резултатите с тези от записи в реална физическа система;
- Биха били полезни за изследването и други интересни подходи:
 - Фрактални методи и хаотична динамика – за сложни, нелинейни системи.
 - Agent-based модели – симулации на системи с множество взаимодействащи агенти (например пазари).
 - Фазови пространства и реконструкция на атрактори – при прогнози в системи с нелинейна динамика.
 - За времеви редове бих препоръчал да се използва и SARIMA + Gradient Boosted Trees (XGBoost) с последващо сравнение на резултатите;
- На много места в текста липсват цитирания или последваща редакторска обработка на поставен абзац;
- Липсата на дефинирани перспективи и следващи цели за развитие на разработката приемам като запазване на конфиденциална информация.

Направените забележки и препоръки не омаловажават постигнатото в дисертационния труд. Достоинствата му са очевидни.

11. Заключение с ясна положителна или отрицателна оценка на дисертационния труд

Личното ми становище е, че представения труд е *актуален* и *стойностен*. Притежава достатъчно научни, научно-приложни и инженерно-приложни приноси. Като обем, брой и сложност на анализирани проблеми, намерени решения и направени авторски разработки надхвърля изискванията.

Разработките в дисертацията са описани компетентно и в необходимата пълнота, изводите и заключенията са много добре построени и аргументирани. Дисертационният труд отговаря на изискванията на ЗРАСРБ, Правилника за прилагане на закона и съответния Правилник на Техническия университет - София.

Получените в дисертационния труд научно-приложни и приложни приноси, демонстрираните високо образователно ниво и натрупан теоретически и изследователски опит с постигнати и практически резултати в една актуална област, ми дават достатъчни основания убедено да препоръчам на Уважаемото жури да присъди на маг. инж. Таньо Иванов Танев образователната и научна степен „Доктор“ в областта на висше образование „Технически науки“, професионално направление 5.2 „Електротехника, електроника и автоматика“, научна специалност „Електрически мрежи и системи“.

Дата: 24.03.2026г.

Рецензент:

/проф. д-р инж. Ангел Цолов/

REVIEW

on a dissertation for the degree of Doctor of Education and Science
in the field of higher education "Technical Sciences",
professional field 5.2 "Electrical Engineering, Electronics and Automation",
scientific specialty "Electrical Networks and Systems"

Author of the thesis: M. Sc. Eng. Tanyo Ivanov Tanev

Theme of the dissertation: "STUDY OF THE OPERATING REGIMES OF PHOTOVOLTAIC
POWER PLANTS "

Scientific supervisor. Assos. Prof. Eng. Rad Hristov Stanev

Reviewer. Prof. PhD Eng. Angel Belchev Tcolov, TU-Sofia, Department of Electrical Power
Engineering

1. The scientific and applied relevance of the problem developed in the thesis. Degree and level of topicality of the problem and specific tasks developed in the thesis.

Considering the dynamics and nature of changes in the Bulgarian electricity system in recent years and the strategies outlined in the European SET Plan, the topic of this dissertation is highly relevant. Power generation sources with a relatively stochastic generation regime are being commissioned, connected at various levels of the system hierarchy, without forward-looking planning or coordination. To a large extent, their generation is not subject to the dispatch control of the Transmission System Operator. On the other hand, the requirements for power quality are increasing. Power systems and their components are already operating in modes close to their limits in terms of reliability and dynamic stability. This necessitates research and the development of new technical (and economic) solutions to the emerging problems. This dissertation investigates the effect of various methods for controlling the operation of RES on the steady-state and transient modes of the power system, for which the corresponding mathematical models have been developed. Based on this research, the aim and objectives of the dissertation have been formulated.

The dissertation is 233 pages long and includes an introduction, three chapters addressing the formulated main objectives, a list of the main contributions, a list of publications related to the dissertation, and a bibliography. A total of 209 references are cited, all of which are in Latin script, and five of them are web addresses. The thesis includes a total of 41 figures and 6 tables.

The aim of the dissertation is to investigate the operating modes of photovoltaic power plants (PVPPs) by developing and validating methodologies and algorithms for mathematical modelling and forecasting of the operating modes of modern PVPPs and their main components.

The research and analyses are primarily divided into the following tasks:

- Analysis and synthesis of modern approaches using machine learning methods for modelling and forecasting electricity generation from PVPPs.
- Mathematical modelling of power generation at PVPPs through modelling of an array of photovoltaic modules.

- Modelling of power generation at PVPPs through mathematical modelling of the efficiency and performance of PV inverters.
- Modelling of voltage under real operating conditions of a battery energy storage system integrated with a PVPP.
- Application and comparison of machine learning methods for forecasting electricity generation at a PVPP based on historical data of the main, most significant influencing factors (solar radiation and ambient temperature).
- Forecasting the electricity production of a PVPP in the short term (day-ahead) by forecasting solar radiation using time series methods.
- Analysis of the results and formulation of recommendations regarding the applicability and accuracy of the proposed models under various climatic and operational conditions.

All of this determines the relevance of the research problem.

The author of the thesis has formulated aims and objectives that are adequate and in accordance with the requirements of a thesis for the acquisition of the educational and scientific degree of "Doctor".

2. Degree of knowledge of the state of the problem and creative interpretation of the literature.

The doctoral candidate has an excellent grasp of the current state of the field and creatively interprets the relevant literature. Following an analysis of the specialized literature, the goal and objectives are clearly defined: the development of mathematical models and software tools that provide a more comprehensive means for accurately and reliably forecasting the behaviour of the power plant during electricity generation over various time horizons.

A significant part of the cited literature consists of recent publications presented at prestigious international forums.

3. Relevance of the chosen research methodology and the stated aim and objectives of the dissertation to the contributions made.

A careful reading of the dissertation reveals that the work follows this main line of reasoning: demonstrating the necessity of the research, an analysis of typical (traditional) methods for finding solutions (advantages and disadvantages in specific processes), the definition of requirements, and the synthesis of new, non-traditional research methods.

Excellent knowledge of the current state of the researched problems, along with in-depth knowledge of methods for the design, analysis, and optimization of devices, enables the doctoral candidate to develop original computer models of the devices, select and apply effective research methods, and validate the obtained results.

The research methodology chosen by the doctoral candidate is consistent with the stated aims and objectives of the thesis and has enabled them to be achieved at a high level.

4. Brief analytical characterisation of the nature and assessment of the reliability of the material on which the contributions of the thesis are based.

An in-depth literature review was conducted on the current state of predictive analysis methods, as well as on modern approaches using machine learning methods for modelling and forecasting electricity generation from PVPPs.

The research conducted shows that the assessment of emerging technologies, control strategies, and trends in the development of control systems is of paramount importance for determining parameter values when identifying new solutions and improvements.

The research and analyses are primarily divided into the following seven tasks related to the operation of PVPPs: Analysis and synthesis of current approaches using machine learning methods for modelling and forecasting electricity generation from PVPPs; Mathematical modelling of PVPP electricity generation through modelling of an array of photovoltaic modules; Modelling of PVPP electricity generation through mathematical modelling of the efficiency and performance of PV inverters; Modelling of voltage under real operating conditions of a battery energy storage system integrated with a PVPP; Application and comparison of machine learning methods for forecasting electricity generation at a PVPP based on historical data of the main, most significant influencing factors (solar radiation and ambient temperature); Forecasting the electricity production of a PVPP in the short term (day-ahead) by forecasting solar radiation using time series; Analysis of the results and formulation of recommendations regarding the applicability and accuracy of the proposed models under various climatic and operational conditions.

The second chapter focuses on the development, implementation, and experimental validation of mathematical models for describing the operating modes of a PVPP and its key components. The chapter includes three consecutive studies, practically divided into separate sections:

- a structural combined model of the PVPP, including a photovoltaic generator, DC cabling, and an inverter;
- a specialized model for the efficiency/output power of a grid-connected photovoltaic inverter using multiple linear regression;
- a regression model for the voltage of an electrical energy storage system (EESS) integrated into the PV system.

The overall objective of this chapter is to demonstrate that, with an appropriate balance between physical-structural relationships and empirical models (regression), it is possible to achieve practically applicable accuracy, short computation time, and the ability to tune the model to a specific power plant using a limited set of measurable/available input parameters.

Chapter 3 includes three consecutive studies, namely:

- modelling and forecasting of electricity generation from PVPPs;
- modelling of battery energy storage systems (BESS) by applying machine learning (ML) and deep learning (DL) methods;
- a study on forecasting PV plant generation by forecasting solar radiation using time series.

The aim of the research is to evaluate the applicability and accuracy of various data-driven models under real operating conditions and to investigate the influence of the training period and the optimization of hyper parameters on the quality of the forecasts. Currently, modelling battery energy storage systems using machine learning and deep learning is a hot topic. The results have been validated and show that models based on decision trees, and in particular CatBoost and heterogeneous ensembles, achieve the lowest values of normalized mean squared error. It has been established that a training period of approximately 30 days provides the best trade-off between forecast accuracy and robustness.

I acclaim Eng. Tanev's efforts to seek appropriate combinations of criteria and models in addressing the formulated problems.

In summary, it can be said that the dissertation has successfully addressed the states objectives and formulated solutions or requirements for the defined problems. Research has been conducted, and the corresponding conclusions have been formulated. The chosen research methodology

corresponds sufficiently to the set objectives. The results obtained are systematized in an appendix in a manner that provides a good basis for comparative analysis.

The scientific and applied scientific value of the expected results from the research in the dissertation is evident, as is the realistic possibility of their practical application. The main results of the research have been verified through comparative software-based analytical and hardware-based experimental procedures.

5. Scientific and/or applied scientific contributions of the dissertation

The contributions of this study are significant.

1. Scientific and applied contributions

- A structural approach for investigating the operating modes of a PVPP and its components has been proposed, implemented, and validated using a set of deterministic mathematical models. The approach allows for the determination of operating parameters by representing the individual elements, their parameters, and the relationships between them, thereby recreating the processes and states associated with them.

- Mathematical modelling of electricity generation at PVPPs has been proposed and implemented using various machine learning methods that do not require explicit knowledge of the parameters of the elements and the relationships between them.

- A series of studies has been conducted addressing various types and topologies of PVPPs with and without energy storage systems, using different methods and their modifications applied over various training periods. A comparative analysis of the applicability, qualities, and advantages and disadvantages of the individual methods has been performed. An adaptive determination of the training period has been proposed and implemented, and the benefits of this approach have been substantiated.

2. Applied Contributions

- Software implementations have been developed that enable the achievement of the research objectives and tasks regarding the methods and tools for modelling PVPPs in order to study their operating modes.

I accept the claims of contribution. The results obtained are original and fully meet the requirements for a dissertation for the award of the educational and scientific degree of “Doctor.” Their application is feasible at the present stage.

6. Assessment of the degree of personal involvement of the doctoral candidate in the contributions

The PhD student’s work is characterized by an in-depth understanding of the current state of the field and significant results achieved. As evident from the list of authors in the publications, as well as from the appendices containing the research results, a project of this nature and scope undoubtedly requires teamwork. His personal contributions are also confirmed by the fact that he is listed as the first author in four of his six publications.

It is clear that the doctoral candidate has mastered and works fluently with specific mathematical tools, and that he handles complex research tasks, solving them independently or as part of a team.

All of this, along with my personal observations of the PhD student’s work, lead me to conclude that the presented portion of the research as a dissertation and the contributions therein are the candidate’s own work.

7. Assessment of the publications related to the thesis: number, type of publications in which they appear. Reflection in the scientific community - use and citation by other authors, in other laboratories, countries, etc.

The main achievements and results of the dissertation have been published in six papers, all of which are co-authored. All publications have been presented at international conferences and in journals and are indexed in IEEE and SCOPUS.

Attached to the dissertation is a list of six publications for the period 2018–2025. There are no solo publications. All are co-authored with the academic advisor or a larger group. Five of the publications are in Electrical Engineering Faculty Conferences (2 in BuleEF, two in SIELA, one in ELMA) and one in Energies 2025 (Q1).

A declaration by the doctoral candidate regarding the originality and authorship of the contributions in his dissertation has not been provided.

A total of 21 citations by other authors are noted.

All publications are related to the topic of the dissertation and are listed in SCOPUS. The choice of primarily technical forums as a venue for presentation ensures additional peer review by a larger number of specialists.

8. Use of the dissertation results in scientific and social practice. Existence of direct economic impact, etc. Documents on which the claim is based.

The research conducted on statistical analysis, computer modelling, and optimization of PVPP operating modes and energy storage systems has practical applications in identifying new solutions and improvements in their development. The results obtained can support the development of methods and strategies for controlling and managing the operating modes of PVPPs.

The dissertation develops and validates methodologies for modelling PV plant components, as well as for forecasting electricity generation from PVPPs, based on modern machine learning and deep learning methods. A structured database of real operational and meteorological data was used for the purposes of the study. Software implementations have been developed that enable the achievement of the study's objectives and tasks regarding the methods and tools for modelling PVPPs in order to investigate their operating modes.

The use of the obtained results will be beneficial even at this stage.

9. Assessment of the compliance of the abstract with the requirements for its preparation, as well as the adequacy of the coverage of the main points and contributions of the thesis.

The abstract is 32 pages long and has been prepared in accordance with the requirements. It outlines the main findings of the dissertation. I believe it accurately reflects the scientific contributions of the dissertation.

10. Opinions, recommendations and comments.

Recommendations:

- Editorial issues: problems were noted with the conversion of formulas when transferring the information between different text editors. This makes it difficult to analyse the presented material;

- The literature review is overly extensive—accounting for nearly 60% of the text. When combined with the literature references at the beginning of each chapter, this creates the impression of a tautological approach;
- Actual validation of the results of the predictive analysis occurs through comparison with data recorded in a real physical system;
- Other interesting approaches would also be useful for the study:
 - Fractal methods and chaotic dynamics – for complex, nonlinear systems.
 - Agent-based models – simulations of systems with multiple interacting agents (e.g., markets).
 - Phase spaces and attractor reconstruction – for forecasting in systems with nonlinear dynamics.
 - For time series, I would recommend using SARIMA + Gradient Boosted Trees (XGBoost) with a subsequent comparison of the results;
- In many places in the text, citations or subsequent editorial processing of a given paragraph are missing;
- I interpret the lack of defined perspectives and future goals for the development of the research as a matter of preserving confidential information.

The comments and recommendations made do not diminish the achievements of the dissertation. Its merits are evident.

11. Conclusion with a clear positive or negative evaluation of the thesis

My personal opinion is that the presented thesis is timely and valuable. It makes sufficient scientific, applied scientific, and applied engineering contributions. In terms of scope, number, and complexity of the analysed problems, the solutions found, and the original research conducted, it exceeds the requirements.

The developments in the dissertation are described competently and with the necessary thoroughness; the findings and conclusions are very well structured and argued. The dissertation meets the requirements of the Law on Scientific Research and Scientific Activity (ZRASRB), the Regulations for the Implementation of the Law, and the relevant Regulations of the Technical University of Sofia.

The scientific-applied and applied contributions presented in the dissertation, the demonstrated high level of education, and the accumulated theoretical and research experience with achieved practical results in a current field provide me with sufficient grounds to confidently recommend to the Honourable Jury that it award Mr. Eng. Tanyo Ivanov Tanev the academic and scientific degree of “Doctor” in the field of higher education “Technical Sciences,” professional field 5.2 “Electrical Engineering, Electronics, and Automation,” scientific specialty “Electrical Networks and Systems.”

Date: 24.03.2026

Reviewer:

/ Prof. PhD Eng. Angel Tsolov/