



РЕЦЕНЗИЯ

върху дисертационен труд за придобиване на научна степен „доктор на науките“

Автор на дисертационния труд:

Проф. д-р инж. Тодор Стоилов Тодоров

Тема на дисертационния труд:

„Динамика на мехатронни системи, базирани на умни материали“

Професионално направление:

5.1 „Машинно инженерство“

Научна специалност:

„Теория на механизмите, машините и автоматичните линии“

Рецензент:

Проф. д-р инж. Мара Крумова Кандева-Иванова, ТУ-София

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

Дисертационният труд е посветен на теоретично моделиране и експериментално изследване на умни материали за приложението им в инженерни системи с вибрационно и циклично действие. Целта е да се разработят приложни мултифизични теоретични модели на устройства с осцилиращо действие, базирани на умни материали като сплави с памет на формата и пиезоелектрици, с акцент върху влиянието на хистерезисите и да се изработят реални устройства, чрез които да се валидират теоретичните модели.

Темата на дисертацията е изключително актуална, защото има пряко отношение към нарастващите изисквания за мултифункционалност и миниатюризация в областта на мехатронните системи. Системното изследване на динамичните свойства на интелигентни материали е ключов елемент в разработването на адаптивни, саморегулиращи се и високопроизводителни устройства. Използването на динамичната характеристика на материалите улеснява разработването на прогнозиращи симулации и модели, което позволява да се оптимизират системите при променящи се експлоатационни условия. Това от своя страна е от съществено значение за подобряване на производителността, адаптивността и надеждността на съвременните интелигентни системи.

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

Авторът е извършил комплексно проучване на съвременните изследвания и практически решения в областта на мултифизични системи за генериране на електрическа енергия чрез сплави с памет на формата (СПФ). След задълбочен анализ авторът е направил констатации и изводи, че изследванията на енергийни комбайни, съдържащи сплави с памет на формата в комбинации с пиезоелектрични или елиكتروмагнитни системи, се базират на времеви температурни флуктуации или на отпадъчни вибрации за генериране на електрическа енергия, като липсват изследвания за използване на СПФ за преобразуване на енергия от топлинни източници с постоянна топлина. Някои предварителни изследвания показват, че СПФ притежават необходимия потенциал да се самовъзбуждат вибрационно от източник на постоянна температура при определени условия.

Целта и задачите на дисертационния труд са ясно и точно формулирани. Цитираната литература в обем на 148 литературни източника и изводите от обзора показват, че авторът добре познава проблема в научно и научно-приложно отношение и оценява пълноценно, с необходимото творчество литературния материал.

Тези факти и личните ми впечатления ми дават основание да окача проф. Т. Тодоров като авторитетен експерт в областта на мултифизичните мехатронни системи.

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

Изследването в дисертационната работа се основава на традиционни методи за изследване в областта на техническите науки и в частност на приложната механика – механоматематично моделиране, числени и експериментални изследвания, моделиране със специализирани софтуерни платформи. Впечатление прави разработването на прецизни експериментални установки и големият обем данни от сензори, монтирани върху елементите на устройствата като термодвойки, акселерометри и сигнали на пиезоелектричните конзоли. Всички измервания са проведени с качествени системи за събиране на данни, позволяващи синхронен запис на всички данни с контрол на експеримента в реално време.

Избраната методика напълно съответства на поставената цел и задачи на дисертационния труд.

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

Дисертационният труд има обем от 287 стр., от които 32 стр. са анализ на съвременното научно ниво в областта на мехатронните енергодобивни и енергоефективни системи (първа глава). Дисертацията е представена в 7 глави, увод, заключение, научни и научно-приложни приноси, литература. Тя съдържа списък на 213 фигури, 15 таблици и 148 литературни източника. Към дисертацията има три приложения с общ обем 170 страници. Във втора глава са представени общите характеристики на термомеханични вибрационни системи, подлежащи на изследване. В трета глава са дефинирани диапазоните на променливите, от съображения да се формулира правилна задача за анализ на състоянието и условията за съществуване на осцилационни режими. В четвърта глава се изследва устойчивостта на термоелектромеханични системи и се дефинират условията за съществуване на стационарни осцилиращи режими. Глава пета е посветена на моделиране на сложни мултифизични системи, съчетаващи в единство механични, термодинамични, електрични процеси и ефекти като пиезоелектричен ефект, ефект на памет на формата със структурно-фазови изменения и хистерезиси. В шеста глава са представени резултати от експериментални изследвания при тестови изпитания на реални прототипи, чрез които теорията е успешно валидирана. В глава 7 са представени приложения на задвижвания чрез сплави с памет на формата върху модели и прототипи, разработени в катедра ТММ. Глава 8 съдържа обобщение на резултатите от изследванията на теоретичния модел и експерименталните изследвания на енергиен харвестер и заключение за цялостната работа по дисертацията.

5. Научно-приложни и приложни приноси на дисертационния труд

Приемам следните научни и научно-приложни приноси на дисертационния труд:

Научни приноси на дисертационния труд

5.1. Формулиране и обосновка на нови хипотези:

- Формулирана е първа хипотеза, наречена **физическа**, че ако съществува квазистационарно или стационарно топлинно поле с монотонно променлив пространствен температурен градиент, е възможно да се създаде осцилираща механична система, която чрез фазово-структурни кристалографски промени с хистерезиси да генерира енергия, преобразуваща се в електрическа.
- Формулирана е втора хипотеза, наречена **математическа**, че ако съществува и може да се дефинира функционал на качеството на

термоелектромеханичната система, е възможно да се определят параметрите му в допустими диапазони и при наличие на ограничения, така че да се гарантира устойчив осцилационен режим чрез минимизиране на този функционал.

5.2. Доказване с нови средства на съществени нови страни в съществуващи научни проблеми и теории:

- Доказано е теоретично и валидирано експериментално, че при наличие на топлинно поле с монотонно променлив пространствен градиент е възможно да се създаде осцилираща механична система чрез нишка от сплав с памет на формата.
- Създадена е и валидирана експериментално нова теория за моделиране на хистерезиси в СПФ чрез коефициенти на пропорционалност, позволяващи една аналитична форма да се прилага многократно както за основен мажорен хистерезис, така и за минорни и субминорни хистерезиси.
- Създадени и валидирани са оригинални математични модели (например чрез използване на обратни хиперболични функции) за описание на динамичното поведение на термоеластични елементи от СПФ в осцилиращи режими.
- Чрез уравненията на Лагранж са изведени оригинални мултифизични модели, свързващи механична, пиезоелектрична и топлинна области при наличие на хистерезиси.

5.3. Получаване на потвърдителни факти:

- Експериментално е потвърдена теорията за пропорционалното моделиране на основни хистерезисни и подхистерезисни явления в СПФ.
- Потвърдени са експериментално оригиналните математически модели за описание на динамичното поведение на термоеластични елементи от СПФ в осцилиращи режими.
- Експериментално са валидирани уравненията на Лагранж и са изведени оригинални мултифизични модели, свързващи механична, пиезоелектрична и топлинна области при наличие на хистерезиси.

Научно-приложни приноси на дисертационния труд

5.4. Създаване на нови методи на изследване:

- Намерени са оригинални числени решения на мултифизични модели, които са потвърдени експериментално.
- Създадени са нови експериментални методи за едновременно измерване на няколко физични величини в реално време и тяхното записване с възможности за управление на експеримента.

- На основата на разработените стендове за едновременно измерване и записване на няколко физични величини с висока честота на дискретизация (семплиране) до 2 Msps и висока разделителна способност са създадени цикли от лабораторни упражнения по учебни дисциплини като „Технология и приложения на МЕМС“ във ФИТ, „Основни принципи и приложение на микро- и наносистеми“ във ФЕТТ, „Микротехника“ във ФМ и в дисциплини, преподавани на английски език като „Mechanical Fundamentals of Microelectromechanical Systems“ във Факултета по английско инженерно обучение и „Microelectromechanical Systems“ в МФ.

5.5. Създаване на нови конструкции:

- Проектирани и са изработени разновидности на енергийни харвестери със самовъзбуждащи се осцилации, индуцирани от източник на постоянна температура, съставен от наклонени срещуположно еластични пиезоелектрически конзоли, опъващи чрез свободните си краища нишка от СПФ.
- Създаден е енергиен вибрационен харвестер с нишка от СПФ, която се нагрява от междинен ротационен елемент, нагрят от източник с постоянна температура.
- Проектиран и е изработен стенд за изпитване на СПФ, чрез който се измерват едновременно в реално време преместване, сила, температура, ток, електрическо напрежение и множество производни величини.
- Създадени са опитни образци за управление на пропорционални клапани за сградна автоматизация.
- Проектирани са и произведени оптимизирани опитни образци за on/off управление на клапани чрез бистабилни механизми.

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

Запозната съм с научната дейност на проф. Т. Тодоров, с неговите теоретични и експериментални изследвания. От представените 13 бр. трудове към дисертационния труд в 4 от тях проф. Тодоров е водещ автор. Разговорите ми с автора, неговият дългогодишен и богат опит в областта на мехатронните системи са показател, че дисертационният труд и неговите приноси представляват лично дело на автора.

7. Преценка на публикациите по дисертационния труд

Основните резултати от изследването са намерили отражение в 13 бр. колективни публикации, реферирани в Scopus, от които 4 бр. с IF над 2.2. и 9 броя с IF под 2.2. В 4 бр. публикации авторът е водещ автор.

До момента общият брой на цитиранията в Scopus е 99 бр. От тях независимите цитирания в Scopus са 64 бр. От публикациите с IF над 2.2 в Scopus са получени общо 25 бр. цитата, от които 18 бр. са независими цитата. От публикациите с IF под 2.2 в Scopus общият брой на цитиранията е 74, от които 46 бр. са независими цитирания. Публикувана е една статия по темата на дисертацията в реферирано българско списание и няколко статии в руски издания. Има 2 цитирания на един патент. По тематиката на дисертацията са защитени 4 патента и подадена една заявка за патент.

8. Използване на резултатите от дисертационния труд в научната и социална практика

Дисертационното изследване има съществено значение за науката и университетското образование при разработване на динамични модели и прототипи на микроелектромеханични системи, съдържащи материали с памет на формата. Приносите на труда характеризират автора като еродиран изследовател, признат учен и преподавател на високо ниво, ползващ теоретичните и експериментални методи.

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 в достатъчна степен отразява същността на дисертационния труд, отговаря на изискванията и съдържа основните положения и приноси.

10. Мнения, препоръки и бележки

Нямам критични бележки по съдържанието на дисертационния труд.

11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на анализа на представения ми дисертационен труд, неговата значимост и приноси, считам, че дисертационният труд напълно съответства на изискванията на Закона за развитието на академичния състав в Република България. Във връзка с това си позволявам да препоръчам на уважаемото научно жури да присъди на автора проф. д-р инж. Тодор Стоилов Тодоров научната степен „доктор на науките“.

15.12.2025 г.
София

Рецензент:
/проф. д-р инж. М. Кандева-Иванова/

УИТ 41-КС2-107
15.12.2025г.



REVIEW

of the dissertation thesis for obtaining scientific degree of Doctor of Sciences

Author of the dissertation thesis:

Prof. Dr. Eng. Todor Stoilov Todorov

TITLE:

"Dynamics of mechatronic systems based on smart materials"

Scientific direction:

5.1 "Mechanical Engineering"

Scientific specialty:

"Theory of mechanisms, machines and automatic lines"

REVIEWER:

Prof. Dr. Eng. Mara Krumova Kandeveva-Ivanova, Technical University of Sofia

1. Actuality of the problem solved in the dissertation in research and research & applied aspect

The dissertation is dedicated to theoretical modeling and experimental study of smart materials for their application in engineering systems with vibration and cyclic action. The goal is to develop applied multiphysics theoretical models of devices with oscillating action, based on smart materials such as shape memory alloys and piezoelectrics, with an emphasis on the influence of hysteresis, and to develop real devices through which to validate the theoretical models.

The topic of the dissertation is extremely relevant because it is directly related to the increasing requirements for multifunctionality and miniaturization in the field of mechatronic systems. Systematic study of the dynamic properties of smart materials is a key element in the development of adaptive, self-regulating and high-performance devices. The use of the dynamic characteristics of materials facilitates the development of predictive simulations and models, which allows optimizing systems under changing operating conditions. This, in turn, is essential for improving the performance, adaptability and reliability of modern smart systems.

2. Degree of knowledge of the state of the problem and creative interpretation of the literary material

The author has conducted a comprehensive study of contemporary research and practical solutions in the field of multiphysics systems for generating electrical energy using shape memory alloys (SMAs). After a thorough analysis, the author has made findings and conclusions that the research on energy harvesters containing shape memory alloys in combination with piezoelectric or electromagnetic systems is based on temporal temperature fluctuations or waste vibrations to generate electrical energy, with a lack of research on the use of SMAs for energy conversion from constant heat sources. Some preliminary studies show that SMAs have the necessary potential to be vibrationally self-excited from a constant temperature source under certain conditions.

The aim and objectives of the dissertation are clearly and precisely formulated. The cited literature in the amount of 148 literary sources and the conclusions from the review show that the author is well acquainted with the problem in scientific and scientific-applied terms and fully appreciates, with the necessary creativity, the literary material.

These facts and my personal impressions give me reason to characterize Prof. T. Todorov as an authoritative expert in the field of multiphysics mechatronic systems.

3. Conformity of the selected research methodology with the aim and tasks of the dissertation

The research in the dissertation work is based on traditional research methods in the field of technical sciences and in particular applied mechanics - mechanomathematical modeling, numerical and experimental studies, modeling with specialized software platforms. The development of precise experimental setups and the large volume of data from sensors mounted on the elements of the devices such as thermocouples, accelerometers and signals of the piezoelectric consoles are impressive. All measurements were carried out with high-quality data acquisition systems, allowing synchronous recording of all data with real-time control of the experiment.

The chosen methodology fully corresponds to the set goal and objectives of the dissertation.

4. Brief analytical characterization of the nature and assessment of the reliability of the material on which the contributions of the dissertation are built

The dissertation has a volume of 287 pages, of which 32 pages are an analysis of the modern scientific level in the field of mechatronic energy-generating and energy-efficient systems (first chapter). The dissertation is presented in 7 chapters,

introduction, conclusion, scientific and scientific-applied contributions, literature. It contains a list of 213 figures, 15 tables and 148 literary sources. There are three appendices to the dissertation with a total volume of 170 pages. In the second chapter, the general characteristics of thermomechanical vibration systems subject to study are presented. In the third chapter, the ranges of variables are defined, in order to formulate a correct task for analyzing the state and conditions for the existence of oscillatory modes. In the fourth chapter, the stability of thermoelectromechanical systems is investigated and the conditions for the existence of stationary oscillatory regimes are defined. Chapter five is dedicated to modeling complex multiphysics systems, combining in unity mechanical, thermodynamic, electrical processes and effects such as the piezoelectric effect, shape memory effect with structural-phase changes and hysteresis. The sixth chapter presents results from experimental research in test trials of real prototypes, through which the theory has been successfully validated. Chapter 7 presents applications of shape memory alloy drives on models and prototypes developed in the Department of Mechanical Engineering. Chapter 8 contains a summary of the results of the theoretical model research and experimental studies of an energy harvester and a conclusion on the overall work on the dissertation.

5. Scientific and scientific & applied contributions of the dissertation work

I accept the following scientific and scientific & applied contributions of the dissertation work:

Scientific contributions of the dissertation work

5.1. Formulation and justification of new hypotheses:

- A first hypothesis, called **physical**, was formulated, that if there is a quasi-stationary or stationary thermal field with a monotonically varying spatial temperature gradient, it is possible to create an oscillating mechanical system that, through phase-structural crystallographic changes with hysteresis, generates energy that is converted into electricity.
- A second hypothesis, called **mathematical**, has been formulated, that if a functional of the quality of the thermoelectromechanical system exists and can be defined, it is possible to determine its parameters within permissible ranges and in the presence of constraints, so as to guarantee a stable oscillatory regime by minimizing this functional.

5.2. Proving by new means significant new aspects of existing scientific problems and theories:

- It has been theoretically proven and experimentally validated that in the presence of a thermal field with a monotonically varying spatial gradient, it is

possible to create an oscillating mechanical system using a shape memory alloy filament.

- A new theory for modeling hysteresis in SPFs using proportionality coefficients has been created and experimentally validated, allowing one analytical form to be applied repeatedly for both basic major hysteresis and minor and subminor hysteresis.
- Original mathematical models (e.g. using inverse hyperbolic functions) have been created and validated to describe the dynamic behavior of thermoelastic elements from SPF in oscillating modes.
- Through Lagrange's equations, original multiphysics models have been derived, connecting mechanical, piezoelectric and thermal domains in the presence of hysteresis.

5.3. Obtaining supporting facts:

- The theory of proportional modeling of basic hysteresis and subhysteresis phenomena in SPF has been experimentally confirmed.
- The original mathematical models for describing the dynamic behavior of thermoelastic elements from SPF in oscillating modes have been experimentally confirmed.
- Lagrange's equations have been experimentally validated and original multiphysics models have been derived, connecting mechanical, piezoelectric and thermal domains in the presence of hysteresis.

Scientific & applied contributions of the dissertation work

5.4. Creating new research methods:

- Original numerical solutions of multiphysics models have been found and have been confirmed experimentally.
- New experimental methods have been created for simultaneous measurement of several physical quantities in real time and their recording with experimental control capabilities.
- Based on the developed stands for simultaneous measurement and recording of several physical quantities with a high sampling frequency (sampling) of up to 2 Msps and high resolution, cycles of laboratory exercises have been created in academic disciplines such as "Technology and Applications of MEMS" at the Faculty of Electrical Engineering, "Basic Principles and Applications of Micro- and Nanosystems" at the Faculty of Electrical Engineering, "Microtechnics" at the Faculty of Mechanical Engineering and in disciplines taught in English such as "Mechanical Fundamentals of Microelectromechanical Systems" at the Faculty of English Engineering and "Microelectromechanical Systems" at the Faculty of Mechanical Engineering.

5.5. Creating new constructions:

- Varieties of energy harvesters with self-excited oscillations induced by a constant temperature source, composed of inclined oppositely elastic piezoelectric cantilevers, stretching a filament of SPF through their free ends, have been designed and manufactured.
- An energy vibration harvester has been created with a filament of SPF, which is heated by an intermediate rotating element heated by a constant temperature source.
- A test bench for the SPF has been designed and manufactured, through which displacement, force, temperature, current, electrical voltage and multiple derived quantities are measured simultaneously in real time.
- Experimental models for controlling proportional valves for building automation have been created.
- Optimized prototypes for on/off valve control using bistable mechanisms have been designed and manufactured.

6. Assessment of the degree of the dissertation candidate's personal participation in the contributions

I am familiar with the scientific activity of Prof. T. Todorov, with his theoretical and experimental research. Of the 13 papers presented to the dissertation, Prof. Todorov is the lead author in 4 of them. My conversations with the author, his long-standing and rich experience in the field of mechatronic systems are an indicator that the dissertation and its contributions are the author's personal work.

7. Assessment of dissertation publications

The main results of the study have been reflected in 13 collective publications, referenced in Scopus, of which 4 with IF above 2.2. and 9 with IF below 2.2. In 4 publications, the author is the lead author.

So far, the total number of citations in Scopus is 99. Of these, 64 are independent citations in Scopus. A total of 25 citations have been received from publications with IF above 2.2 in Scopus, of which 18 are independent citations. From publications with IF below 2.2 in Scopus, the total number of citations is 74, of which 46 are independent citations. One article on the topic of the dissertation has been published in a refereed Bulgarian journal and several articles in Russian publications. There are 2 citations of one patent. 4 patents have been protected on the topic of the dissertation and one patent application has been filed.

8. Utilization the results of the dissertation in scientific and social practice

The dissertation research is of significant importance for science and university education in developing dynamic models and prototypes of microelectromechanical systems containing shape memory materials. The contributions of the work characterize the author as an eroded researcher, a recognized scientist and a high-level teacher, using theoretical and experimental methods.

9. Assessment of the compliance of the autoreferer with the requirements for its preparation, as well as the adequacy of reflecting the main points and contributions of the dissertation work

The autoreferer sufficiently reflects the essence of the dissertation work, meets the requirements and contains the main points and contributions.

10. Opinions, recommendations and notes

I have no critical remarks about the content of the dissertation.

11. CONCLUSION

Based on the analysis of the dissertation work presented to me, its significance and contributions, I believe that the dissertation work fully complies with the requirements of the Act on the Development of the Academic Staff in the Republic of Bulgaria. In this regard, I take the liberty of recommending to the esteemed scientific jury to award the author, Prof. Dr. Eng. Todor Stoilov Todorov, the scientific degree "Doctor of Sciences".

15.12.2025
Sofia

Reviewer:
/prof. Dr. Eng. M. Kandeva-Ivanova/