

РЕЦЕНЗИЯ

на дисертационен труд

за придобиване на образователната и научна степен „доктор”

в професионално направление 4.1 Физически науки, Радиофизика и физическа електроника

по процедура за защита във Физически факултет (ФзФ)
на Софийски университет „Св. Климент Охридски“ (СУ)

Рецензията е изготвена от: доцент д-р Стилиян Стилиянов Лишев – кат. Радиофизика и електроника при ФзФ на СУ, в качеството му на член на научното жури съгласно Заповед № РД 38-472/24.07.2024г. на Ректора на Софийския университет.

Тема на дисертационния труд: “Електротермичен плазмен двигател за малко спътници”

Автор на дисертационния труд: Стоил Николаев Иванов

I. Общо описание на представените материали

1. Данни за представените документи

Кандидатът г-н Стоил Иванов е представил дисертационен труд и Автореферат, а така също и автобиография, диплома за магистър, заповед за зачисляване (РО), заповед за трансформиране на докторантурата (ЗО), заповед за удължение на срока на докторантурата, заповед за отчисляване с право на защита, заявление за допускане до предзащита, удостоверение за взети изпити, платежно нареждане за защита, протокол за плагиатство (Прил. 1), становище за плагиатство (Прил. 2), доклад за плагиатство, научни публикации по дисертацията (5), съгласно изискванията на Физическия факултет при Софийския Университет „Св. Климент Охридски“ от 2018 година, когато е зачислен докторанта.

Представените по защитата документи от кандидата съответстват на изискванията на ЗРАСРБ, ППЗРАСРБ и [Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени и заемане на академични длъжности в СУ „Св. Климент Охридски“](#) (ПУРПНСЗАДСУ).

2. Данни за кандидата

Г-н Стоил Николаев Иванов защитава, с отлична оценка, своята бакалавърска (2010 год.) и магистърска (2017 год.) степени, съответно, в специалност „Инженерна физика“ и „Аерокосмическо инженерство и комуникации“ във Физическия факултет (ФзФ) на СУ „Св. Кл. Охридски“. Паралелно със следването си г-н Стоил Иванов работи като: инженер-дизайнер в Prototyp Ltd. Sofia (2008-2009), мениджър-проекти в Juventa-3 Ltd. (2009-2010) и в APG Europe GmbH (2010-2014), ръководител на отдел за подготовка на кадри в Prototyp Ltd. Sofia (2014-2018) и е основател и ръководител на Obsolon Ltd. (2018-), което собствено говори за високо ниво на професионализъм и креативност на кандидата. От 2018 година е зачис-

лен като редовен докторант към катедра Радиофизика и електроника (РФЕ) във ФзФ, с ръководител доц. д-р Живко Кисьовски. Темата на докторантурата е насочена към моделиране, разработване и изследване на нов вид миниатюрен микровълнов електротермичен (МЕТ) плазмен двигател, на базата на разряд на повърхнинна вълна, който е съобразен с изискванията на кюбсат-платформите (размери до 125 cm^3 , маса до 300 g и консумирана мощност до 10 W). В тази връзка, докторантът е част от колектива в два големи научни проекта съответно към Националния фонд за научни изследвания (на МОН) и Национална научна програма “Млади учени и постдокторанти”. През 2021 година г-н Стоил Иванов печели конкурс за асистент във ФзФ при СУ и понастоящем заема тази длъжност в катедра РФЕ. Пълната преподавателска натовареност и допълнителните ангажименти, свързани с нея, налагат трансформиране на докторантурата, през 2021 год., в задочна. В началото на 2023 год., поради изтичане на срока на докторантурата, г-н Стоил Иванов е отчислен с право на защита. През 2024 год. докторантът напълно покрива всички изисквания на ФзФ за допускане до защита, която преминава успешно.

3. Обща характеристика на научните постижения на кандидата

Разработването на унифицирани нано- и микроспътници, в рамките на стандарта CubeSat (кюбсат), както и свързаните с тях изследвания, е **атрактивно** с оглед на значително намалените разходи за производство и високата им степен на интегриране в орбитални спътникови системи, които са изключително ефективни и гъвкави в събирането и обмена на данни, в локален и глобален мащаб. Наличието на бордови двигател при този тип спътници се явява ключов елемент, осигурявайки максимално време на оперативен живот (до няколко години) и деорбитирането им, след неговото приключване (за ограничаване акумулирането на космически боклук в околосемна орбита). Бордовите двигатели разработван за кюбсат-платформите трябва да покриват определени технически изискванията, в зависимост от категорията на спътника, за: размер, маса и консумирана мощност. В тази връзка изключително предимство при конфигурация 1U спътниците имат **миниатюрните МЕТ двигатели**, чиято енергийна ефективност е над 90 %. Това прави изследванията в тази област, част от които е и настоящия дисертационен труд, изключително **актуални и значими**.

Научните постижения на кандидата, отразени в дисертационния труд, са изразяват в **две статии в списания с импакт фактор** [3 и 5] (съответно, квартали Q3 и импакт фактор 1.3 (WebofScience)) и **два доклада** на конференции [2 и 4], публикуван **в пълен текст** (без квартал, реферирани, без импакт фактор). Кандидатът е водещ автор с **основен принос в три научни публикации** [2-4] по дисертацията. Кандидатът има **три участия на научни конференции**, от които два постерни доклада [2 и 4] и един устен доклад [1]. Трябва да се отбележи, че международната конференция „*International Electric Propulsion Conference*“, където кандидатът има два публикувани доклада [2 и 4], е най-реномираната в областта на електрическите спътникови двигатели. Няма данни кандидатът да има публикации извън тези по дисертацията.

Научните публикации, включени в дисертационния труд, **напълно покриват минималните национални изисквания** (по чл. 2б, ал. 2 и 3 на ЗРАСРБ) и съответно на допълнителните изисквания на СУ „Св. Климент Охридски“ (от 2018 год.) за придобиване на образователната и научна степен „доктор“, в съответната научната област и професионално направление.

Въз основа на **предоставените документи** – протокол за плагиатство (Прил. 1), становище за плагиатство (Прил. 2) и доклад за плагиатство – с пълна убеденост може да се заяви, че:

Включените в дисертационния труд научни публикации **не повтарят такива от предишни процедури** за придобиване на научно звание и академична длъжност.

Няма доказано по законоустановения ред **плагиатство** в представените дисертационен труд и Автореферат.

4. Характеристика и оценка на преподавателската дейност на кандидата (ако има изискване в ПУРПНСЗАДСУ за това)

В ПУРПНСЗАДСУ и вътрешния правилник на ФзФ няма изискване за наличието на преподавателска дейност. Въпреки това, искам да отбележа, че като асистент към кат РФЕ на ФзФ от 2021 год., г-н Стоил Иванов изгражда и поддържа високо мнение сред преподавателската колегия и студентската общност във факултета, а също така има съществен принос в актуализацията на магистърската програма по „Аерокосмическо инженерство и комуникации“, където води редица базови дисциплини.

5. Съдържателен анализ на научните и научно-приложните постижения на кандидата съдържащи се в материалите за участие в конкурса

Изследванията по дисертацията са част от работата на авторския колектив, към който принадлежи и кандидата, върху моделиране и разработване на миниатюрен МЕТ плазмен двигател за конфигурация 1U кубсат спътници, на базата на разряд на повърхнинна вълна, в рамките на два проекта:

„Електротермичен микровълнов плазмен двигател за българските нано-сателити“, Национален фонд научни изследвания, МОН – КП-06-ОПР 01/1 от 2018;

Национална научна програма “Млади учени и постдокторанти”, одобрена с постановление на МС – 577 от 17.08.2018.

Работата по дисертацията е теоретична и експериментална, като експериментите са проведени изцяло във ФзФ на СУ.

Авторефератът (на български), като цяло, е структуриран ясно и отразява адекватно съдържанието на дисертацията.

Дисертационният труд включва Увод, шест Глави, Заключение, Списък на публикациите по дисертацията, Литература, Списък на фигурите и Списък на таблиците, означени последователно като отделни Точки. Общият му обем е 111 страници, като съдържа 72 фигу-

ри, 3 таблици и 111 цитирани литературни източника, към които са включени и публикацииите по дисертацията. По своята същност **Глави 1 и 2** (Точки 2 и 3 от дисертацията) представляват литературен обзор, съобразно целта и задачите на дисертацията, а в **Глави 3-6** (Точки 4-7) са представени основните резултати от изследванията в дисертационния труд. Изложението е на добър научен стил и технически добре оформено. Резултатите са представени с разбиране на изследваните проблеми, както и на използваните методи и техники от литературата.

В Увода на дисертацията (Точка 1), след кратък общ преглед върху различните категории спътници и областите на тяхното приложение, са представени най-популярните орбити за миниатюрни спътници и разпределението на мисиите им според вида на тяхното приложение. След това са изнесени основни данни за конфигурациите в стандарта кубсат, като са посочени основните преимущества на разглежданата платформа и проблемите, произтичащи от миниатюризацията на сателитите в нея – ограниченото време на оперативен живот и акумулирането на космически боклук в околоземна орбита, след неговото приключване. На тази база е аргументирана необходимостта от наличието на бордови двигател в спътника, като са посочени преимуществата и недостатъците на различните типове двигатели, сред които – по отношение на нано- и микросателитите – МЕТ двигателите са най-удачни, осигурявайки енергийна ефективност над 90 %. Непосредствено след това са формулирани ясно целта и поставените задачи. **Основната цел** е моделиране, разработване и изследване на нов вид миниатюрен МЕТ плазмен двигател, на базата на разряд на повърхнинна вълна, който е съобразен с изискванията на кубсат-платформите (размери до 125 cm^3 , маса до 300 g и консумирана мощност до 10 W). **Конкретните задачи** са:

- 1) Електродинамично моделиране на разряд на повърхнинни вълни в камера с крайни размери, с оглед на тяхната оптимизация.
- 2) Определяне на механизмите на нагряване на газа и съответните оптимални условия за ефективен енергиен трансфер.
- 3) Създаване на установка за изследване на предложения МЕТ двигател.
- 4) Измерване на параметрите на МЕТ двигателя без сопло и със сопло. Оптимизиране на параметрите на експеримента.

Формулировката на **поставените задачи съответства на целта на дисертацията**. Изложението в Увода е с обем от 7 страници, като са цитирани 10 литературни източника.

В Глава 1 (Точка 2 от дисертацията) са въведени най-основните понятия от физика на плазмата (степен на йонизация, Дебаевски радиус, плазмена честота, равновесна/неравновесна плазма), след което е изнесено компактно описание на разрядите поддържани в поле на повърхнинна вълна. Разгледани са основните механизми на създаване и поддържане на плазмата при този тип разряди, както и електродинамичното описание на азимутално-симетричните ТМ-вълните в безкраен плазмен стълб, заобиколен от вакуум. Дадени са изразите за комплексната диелектрична проницаемост на плазмата, напречните вълнови числа и

локалния дисперсионен закон, както и типичното разпределение на електричното поле на вълната в радиално направление и вида на фазовите диаграми за плазма без удари (т.е. без загуба на енергия на вълната). Материалът е изнесен в обем от 7 страници, като са цитирани 7 литературни източника.

В Глава 2 (Точка 3 от дисертацията), в обем от 39 страници, е направен задълбочен и състоятелен анализ на двигателите за космически апарати, основаващ се на 54 литературни източника. По същество, в тази част последователно са разгледани и анализирани установените технологии за електрическо задвижване на космически апарати (електротермични, електромагнитни и електростатични системи) и модификациите на тяхна база (йонни двигатели с отрицателни йонини, двигатели с ефект на Хол и безелектродни плазмени двигатели с магнитни сопла). Основният акцент е върху системите за задвижване, които са пригодни за употреба на борда на наноспътници – електроспрей, системи на базата на автоелектронна емисия и МЕТ. В началото на Главата са въведени общите параметри на двигателите за космически апарати – бюджет на скоростта, скорост на изхвърляне на пропелента, специфичен импулс, тяга и ефективност.

В Глава 3 (Точка 4 от дисертацията) е представена концепцията за МЕТ двигател, основаваща се на разряд в полето на повърхнинна вълна: Микровълнов сигнал се подава на коаксиална линия (с дължина $\lambda_g/4$), която е свързана с $\lambda_{pl}/4$ резонансна камера, в която част от електромагнитната енергия за поддържане на плазмата отива за нагряване на неутралния газ (пропелент), който разширявайки се през отвор в камерата създава тяга. Изложението е базирано на един доклад [1] (без кватил и без импакт фактор), изнесен на престижна международна конференция (*7th Russian-German Conference on Electric Propulsion*), в който кандидатът е водещ автор.

По същество, в Глава 3 се разглежда част от първата задача, формулирана в Увода на дисертацията и отразява първия и частично четвъртия научени приноси, представени в Заключение. Материалът е изнесен в обем от 13 страници, като са цитирани 8 литературни източника.

В рамките на тази задача са направени оценки за размерите на компонентите на двигателя и са получени начални теоретични резултати за неговите базови параметри. Като първа стъпка, въз основа на известни от литературата локален дисперсионен закон за повърхнинна вълна в система плазма-диелектрик-вакуум-метал и експериментални данни за плазмените параметри в микровълнов разряд, е получена локалната зависимост между електронната концентрация и дължината на вълната в плазмения стълб. След това, на базата на изцяло електродинамична двумерна симулация на конфигурацията на МЕТ двигателя, е получено разпространението на повърхнинна вълна и е определена дължината на резонансната камера, при която е възможно двукратно увеличение на амплитудата на електричното поле. Показано е, че входна мощност от 2 W (при честота 2.45 GHz) осигурява достатъчно висока амплитуда на електрично поле (3×10^5 V/m) за пробив в газа при изхода на коаксиалната линия. Използ-

вайки известната от литературата връзка между газовата температура и обмененото количество енергия при еластични удари електрони-неутрала е получено пространственото разпределение на газовата температура в резонатора, с което са проведени серия от числени симулации на газовия поток и са изчислени параметрите на двигателя – тягата, специфичния импулс и бюджет на скоростта. Въз основа на тяхната количествена оценка е отчетено, че в текущият си вид двигателя има нужда от оптимизация, като са адресирани конкретните насоки за това.

В Глава 4 (Точка 5 от дисертацията) са представени допълнителни числени резултати за оптимизацията на геометричните параметри на МЕТ двигателя, но с оглед на ЕМ съгласуване между предавателната линия и плазмения товар в резонансната камера (т.е., минимален коефициент на стояща вълна (КСВ)). Изложеният материал е базиран на един доклад на международна конференция [2] (рефериран, без квантил и без импакт фактор), в която кандидатът е водещ автор. Резултатите са получени посредством електродинамичния модел на двигателя, представен в предходната Глава на дисертацията, като са варирани дължината и радиуса на резонансната камера при различни стойности на плазмената плътност (считана за хомогенна), със и без допълнителен отрязък от предавателна линия. Показано е, че при висока плазмена плътност ($2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) и фиксирана дължина на съгласуващата линия се постига добро съгласуване ($\text{КСВ} < 1.5$), докато при ниска плазмена плътност ($0.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) трябва да се добави $\lambda_g/4$ импедансен трансформатор.

По същество, в Глава 4 е завършена първата задача, формулирана в Увода на дисертацията, съответно отразена в първия и частично в четвъртия научни приноси, представени в Заключение. Материалът е изнесен в обем от 6 страници, като са цитирани 4 литературни източника.

В Глава 5 (Точка 6 от дисертацията), въз основа на разработен двумерен числен модел основаващ се на флуидната теория на плазмата, са изследвани детайлно механизмите на нагряване на работния газ в разглеждания МЕТ двигател. Моделът имат базов характер за изследванията и практическата разработката на МЕТ двигатели. Изложеният материал е базиран на една научна публикация [3] (квантил Q3, импакт фактор 1.3 (Web of Science)), в която кандидатът е водещ автор.

По същество, в Глава 5 се разглежда втората задача, формулирана в Увода на дисертацията и отразява втория, третия и допълва четвъртия научни приноси, представени в Заключение. Материалът е изнесен в обем от 17 страници, като са цитирани 18 литературни източника.

Приложеният флуиден модел е за аргон, като включва уравненията: за баланс на електроните, положителните йони и възбудените атоми (4s и 4p блокови нива); за баланс на енергията на електроните и атомите в основно състояние; Навие-Стокс за газовия поток и Поасон за плазмения потенциал. В балансните уравнения, потоците на заредените частици са в дрейфово-дифузионно приближение и е отчетено наличието на газов поток. Нагряването на

електроните в полето на повърхнинната вълна е симулирано посредством Гаусов профил на абсорбираната електромагнитна енергия, което е добре аргументирано. В баланса на енергия на атомите в основно състояние са отчетени само процесите на получаване на енергия – чрез еластични удари с електрони, нееластични удари за деактивация на възбудени атоми и нагряване от страна на ускорените в постоянното електрично поле положителни йони. Уравнението на Навие-Стокс е за турбулентен поток, в k - ϵ приближение, което е напълно адекватно за разглежданите газоразрядни условия. Резултати от модела са получени при вариране на абсорбираната високочестотна мощност и входящ масов поток на работния газ. Въз основа на техния анализ е показано, че: Основният механизъм на нагряване на газа са еластичните удари с електрони, при ниски стойности на входящия масов поток на газа (~ 1 mg/s), и нагряване от ускорените в постоянното електрично поле положителни йони, при високи стойности на входящия масов поток на газа (~ 3 mg/s). Генерираната тяга нараства с нарастване на входящия поток на газа и абсорбираната високочестотна мощност, като получената стойност от 1 mN (при мощност 4 W и масов поток 3 mg/s) предоставя адекватно задвижване на кубсат спътник с маса до 4 kg.

В Глава 6 (Точка 7 от дисертацията) са представени резултати от експериментално изследване на предложението MET двигател. Основната цел на проведените експерименти е определяне на газовата температура в газоразрядната камера на двигатели и при известен дебит на работния газ да се оценят параметрите на двигателя, с оглед конструктивна оптимизация. Изложението е базирано на един доклад на международна конференция [4] (реферирани, без кватил и без импакт фактор), в която кандидатът е водещ автор и една научна публикация [4] (кватил Q3, импакт фактор 1.3 (Web of Science)), в която кандидатът е съавтор.

По същество, в Глава 6 се разглеждат последните две задачи (трета и четвърта), формулирана в Увода на дисертацията и отразява последните два научни приноса (пети и шести), представени в Заключение. Материалът е изнесен в обем от 17 страници, като са цитирани 18 литературни източника.

В рамките на предпоследната задача е създадена и окомплектована установка за изследване на предложението MET двигател, за което кандидатът има съществен принос.

Последната задача е върху експерименталното определяне на зависимостта на плазмените параметри (газовата температура, електронна температура и концентрация), при различни конфигурации на резонансната камера (със и без сопло), от налягането на газа и приложената високочестотна мощност (на 2.45 GHz), и на тяхна база се оценят параметрите на двигателя. Подаваната мощност е в импулсен режим, което дава възможност за измерване на скоростта на йонизационния фронт. Експерименталните данни са снети при плазмената струя на изхода на резонансната камера. Плазмените параметри са получени по метода на оптичната емисионна спектроскопия: газовата температура е определяна от OH-линията в снетите спектри чрез съпоставяне с теоретични криви в LIFBASE, а електронната плътност и температура от отношението на интензитетите на Ar-линии [(706.76, 696.6) nm и (706.76,

727.22) nm] в спектрите и прилагането на ударно-радиационен модел. Скоростта на йонизационния фронт е оценена от времезакъснението на сигналите от два фотоумножителя, разположени последователно, по дължината на плазмената струя при изхода на двигателя. Въз основа на анализ на получените резултати е показано, че: С нарастване на налягането на газа (от 10 Torr до 760 Torr), газовата температура и електронната концентрация нарастват, а електронната температура и скоростта на йонизационния фронт намаляват. Наличието на сопло води до по-високи стойности на газовата температура, като в тази си конфигурация МЕТ двигателя демонстрира стабилна работа при ниско налягане (10 Torr), осигурявайки тяга от 4 mN и ефективност от 8 %, при средна внесена високочестотна мощност от 2 W, което го прави напълно подходящ за контрол на орбитите при наносателитите.

Заклучението на дисертация (Точка 8) включва кратко описание на изследваните проблеми и списък с отделени научните приноси на кандидата. Техният характер е с изразена научно-приложна насоченост. Списъкът с публикациите е изнесен в отделна част (Точка 9 от дисертацията), като в нея не са посочени участията в конференции.

6. Критични бележки и препоръки

Основната критична бележка по дисертационния труд е, че в Литературния обзор не са представени флуидната теория на плазмата и методите на оптична-емисионна спектроскопия, на чиято база са получени основните теоретични и експериментални резултати. Структурирането не е направено по най-удачния начин, като някои точки в дисертацията могат да се обединят (пр. Точка 2 и 3, Точка 4 и 5). Също така, в края (или началото) на всеки раздел от Специалната част липсва систематизиран извод от изложените резултати. Публикациите по дисертацията са изнесени в отделен списък (Точка 9 от дисертацията), но същевременно фигурират и в цитираната Литература. В Автореферата (и частично в дисертацията) има излишни повторения, пр. принципът на работа на разглеждания МЕТ двигател. Забелязани са някои печатни грешки и неточности като: предефиниране на означения и физични величини, частично използване на чуждици, терминологични неточности (пр. „мобилност“ вместо „подвижност“, „радиативен“ вместо „радиационен“, „топлинен източник“ вместо „нагряване“, „Вътрешни постоянни електрични полета, породени от заредените частици на плазмата“ при у-ние (59) от дисертацията вместо „плазмения потенциал“) и печатни грешки в някои изрази (пр. (11) от Автореферата и (44) и (67) от дисертацията). Малки означения по осите на фигурите и липса на информация как са получени някои резултати (пр. фиг. 6 от Автореферата и фиг. 42 от дисертацията). Наличните критични бележки не променят общото положително впечатление от дисертационния труд, както и от актуалност и значимост на представените резултати.

Имам следните въпроси към кандидата:

1. Резултатите от началните оценки, представени в Точка 4.(1-4) от дисертацията, за безударна плазма ли са получени и ако: да, то как би повлияло наличието на загуби; не, то как е пресмятана честотата на еластични удари?

2. Защо в израза за нагряването на атомите в основно състояние, (66) от дисертацията, не са отчетени локалните процеси водещи до загуба на енергия и какво е отношението между средната дължина на рекомбинация на положителните йони и характерния размер на газоразрядната камера; как това е свързано с последния член в (66), изразяващ Джауловото нагряване на положителните йони в постоянното електрично поле на разряда?
3. Има ли корелация между експерименталните и теоретични резултати за газовата температура, съответно фиг. 64 и фиг. 52 от дисертацията?
4. По какъв критерии са избрани стойност на честотата и коефициента на запълване на импулсите в експериментите, представени в Точка 6 и 7 от дисертацията, и имат ли тези параметри оптимални стойности?
5. В Литературния обзор е посочено, че МЕТ двигателите имат енергийна ефективност над 90 %, а в Точка 7.2 ефективността е оценена на 8 %. На какво се дължи това различие?

7. Лични впечатления за кандидата

Личното ми впечатление за г-н Стоил Иванов е за инициативен и еродиран човек, с изграден положителен подход в работата си и в общуването с колеги и студенти. То е формирано на базата на изнесените от него доклади на катедрени семинари (във връзка с годишните докторантски атестации), представянето му на предзащитата и материалите по дисертацията (дисертационен труд, автореферат и научни публикации), и отзивите за него в академичната и студентската общности (като преподавател в кат. РФЕ на ФзФ).

8. Заключение

След като се запознах с представените дисертационен труд, Автореферат и другите материали, и въз основа на направения анализ на тяхната значимост и съдържащи се в тях научни и научно-приложни приноси, **потвърждавам**, че научните постижения отговарят на изискванията на ЗРАСРБ и Правилника за приложението му и съответния Правилник на СУ „Св. Климент Охридски“ за **придобиване на образователната и научна степен „доктор“**. В частност кандидатът удовлетворява минималните национални изисквания в професионалното направление и не е установено плагиатство в представените по конкурса: дисертационен труд, Автореферат и научни трудове.

Давам своята **положителна** оценка на дисертационния труд.

II. ОБЩО ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Въз основа на гореизложеното, **препоръчвам** на научното жури да присъди **образователната и научна степен „доктор“** в професионално направление 4.1 Физически науки, Радиофизика и физическа електроника на г-н Стоил Николаев Иванов.

01.09.2024 г.

Изготвил рецензията:

(доц. д-р Стилиян Лишев)