ДТК 78-НС2-063
26.08.2019г.

Р Е Ц Е Н З И Я

върху дисертационен труд за придобиване на

научна степен „ДОКТОР НА НАУКИТЕ"
професионално направление 5.3 Комуникационна и компютърна техника
научна специалност „Комуникационни мрежи и системи"

Автор на дисертационния труд: **проф. д-р инж. Владимир Пулков**

Тема на дисертационния труд: **Подход за предоставяне на повсеместна свързаност и ефективно управление на ресурси в потребителски ориентирани свръх плътни унифицирани безжични мрежи за достъп**

Рецензент: **доц. д-р Камелия Николова, катедра „Комуникационни мрежи", Технически Университет - София**

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.

Научната област на представения за мнение дисертационен труд, без съмнение, е изключително актуална. С развитието на телекомуникационните технологии през последното десетилетие се появи и възможността за пълна свързаност и достъп до комуникационни ресурси на всеки или всяко нещо по всяко време и навсякъде. Непрекъснатото нарастване на броя свързани устройства, различни като технологии и възможности, стремежът към постигане на все по-високи скорости и към все по-голямо разнообразие от услуги и приложения, както и увеличаващите се трафични изисквания поставят нови предизвикателства не само към мрежите за достъп, но и към ефективното управление на ограничените радиочестотни ресурси. Възниква необходимостта от разработване на подходи за увеличаване на пропускателната способност, както и значително намаляване на разходите и потреблението на енергия. Проблемите, засягащи достъпа до мрежата, свързаността и възможностите за предаване и обработване на големи обеми от данни, както и недостиг на комуникационни ресурси, сложна електромагнитна обстановка и взаимна интерференция ще са особено изявени в динамични комуникационни сценарии, каквито ще са тези в бъдещите умни градове, където мобилните потребители и възлите за достъп ще са хетерогенни и с много висока плътност на единица площ. Дисертационният труд е посветен на решаването на тези проблеми и е свързан с предоставяне на повсеместна свързаност и ефективно управление на ресурси в безжични мрежи за достъп, характеризиращи се с изключително голяма плътност както на точки за достъп, така и на потребители независимо от вида им, броя на единица площ и тяхното движение.

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

Литературният обзор, направен в дисертацията, е изключително добре структуриран. Използвани са 218 литературни източника, като преобладаващата част са от последните

10 години. Правят впечатление не само броят и актуалността им, но и високото ниво на компетентност, творческата интерпретация на цитираните литературни източници, както и начинът, по който е синтезирана и обобщена информацията в тях. Всичко това говори за много задълбочено познаване на тематиката и проблемите в нея. Въз основа на направения критичен анализ на развитието на безжичните мрежи за достъп и отчетените особености и динамика на сценариите на комуникации в бъдещите умни градове е формулирана много точно основната цел на дисертационния труд, която може да се обобщи до: **разработване на нови подходи към реализацията на мрежите за достъп, които да осигурят непрекъснатост на достъпа и свързаността на потребителите, като в същото време да позволяват да се имплементират методи за използване и управление на ограничените комуникационни ресурси в безжичния достъп, чрез които да може да се предостави един видимо „безкраен капацитет" на потребителите, независимо от вида им, броя на единица площ и тяхното движение**. За реализирането й са дефинирани три конкретни задачи.

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

Считам, че е направен аргументиран и целесъобразен избор на избраната методика на изследване за постигане на поставената цел. В дисертационния труд са използвани аналитични, статистически и симулационни подходи и анализ на големи обеми от данни. Всички методи и модели са валидирани чрез симулационни експерименти, а резултатите от практическото им имплементиране и тестване са анализирани много детайлно.

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

Дисертационният труд е в обем от 193 страници и в основната си част съдържа увод, четири глави и заключение. Приложени са списъци на фигурите, таблиците, използваните съкращения, публикациите по дисертацията и използваната литература. Съдържанието по отделните глави е много добре разпределено и балансирано. Основните моменти от разработеното в дисертационния труд могат да бъдат обобщени както следва.

В първа глава е направен анализ на развитието на мрежите за достъп и след като са отчетени очакваните динамични комуникационни сценарии в бъдещите умни градове, е предложена концепция за еволюцията на мрежите за достъп към мрежи, базирани на унифициран безжичен достъп. Анализирани са техните особености и характеристики. В резултат са формулирани основните задачи на дисертационния труд, а именно: да се предложат нови схеми за асоциране, групиране и кооперативна комуникация на потребители и точки за достъп, като се вземе под внимание пространственото им разпределение, както и състоянието на безжичните канали; да се предложат подходи за събиране, обработка и анализ на сензорни и мониторингови данни с цел контекстуализиране на безжичния достъп и последващо прогнозиране на поведението на киберфизичната безжична мрежа за достъп; да се предложат методи за споделяне и управление на ресурси, които да позволяват ефективно използване на безжичните въздушни интерфейсни ресурси.

Във втора глава са предложени модели за асоциране, групиране и кооперативна комуникация на потребители и точки за достъп, които да осигурят безпроблемна, повсеместна и непрекъсната свързаност на различните видове потребителски устройства

в кибер-физична безжична система за достъп. За тази цел е предложено да се имплементират две задължителни функционалности в кибер-физичната безжична система за достъп. Приложени са методи за проактивно управление на свързаността и групиране на точки за достъп, като в същото време са използвани евристични алгоритми с ниска изчислителна сложност.

В трета глава са предложени подходи към практическа реализация на обработката и анализът на RF данни в облачни структури, контекстуализирането и предсказването на потребителското поведение. Въведено е ново понятие „RF аналитика", което отразява обработката, анализа и извличането на големи RF данни с различни цели. Разгледани са примери за приложение на RF аналитиката. Разработен е алгоритъм за следене на спектъра, който предлага оптимален компромис между скорост и точност. Предложен е подход, при който се постига динамична и проактивна оптимизация на работата и капацитета на кибер-физична безжична система за достъп като се прилага предсказване на потребителското поведение.

В четвърта глава са предложени подходи с ниска изчислителна сложност за динамично управление на ресурси и реализация на функциите за самоконфигурация, самоорганизация и самооптимизиране в операционната система за достъп до мрежата, като за тази цел са приложени ролеви игрови подход, проактивен механизъм за управление на смущенията и машинно обучение.

Въз основа на изложеното смятам, че структурата на дисертационния труд съответства на темата му.

5. Научни и/или научноприложни приноси на дисертационния труд

Предоставеният за рецензия дисертационен труд безспорно съдържа научни, научно-приложни и приложни приноси. Съгласна съм с изброените в заключението от автора приноси. Те могат да бъдат обобщени както следва:

1. Направен е критичен анализ на развитието на мрежите за достъп (ANs) и са представени аргументирани изводи за невъзможността да отговорят на изискванията, наложени от един хипер-свързан, разнообразен и динамичен сценарий за достъп какъвто ще бъде този в умните градове (SCs) на бъдещето.

2. Дефинирани са основните характеристики на мрежата за достъп в бъдещите умни градове и е предложена нова концепция за структурата и функционалността на една AN в SC и нейната еволюцията към т.н. безклетъчен унифициран безжичен достъп.

3. Предложен е нов подход за моделиране и анализ на работоспособността на архитектура на безклетъчен унифициран безжичен достъп, базирана на концепциите за изграждане и функциониране на кибер-физична система.

4. Разработен е модел за проактивно динамично асоцииране на потребители и групиране на точки за достъп с ниска изчислителна сложност, като е използвана теория на графите. Дефинирана е целева функция и е формулирана оптимизационна задача. Предложен и разработен е евристичен алгоритъм за асоцииране и групиране, комбиниращ предимствата на Евристичното концентриране, Линейното програмиране и Теорията на графите. Направени са симулационни експерименти.

5. Предложен е метод за откриване и свързване на комуникационни възли в широкомащабни неструктурирани и ресурсно ограничени среди с оглед колективно използване на ресурси. Използван е евристичен подход, базиран на модел за партньорство, който позволява дефинирането на различни характеристични показатели или метрики, които да улеснят процеса на асоцииране и предоставяне на свързаност на потребители в една динамична система.

6. Предложен е подход за асоцииране на един потребител към повече от една точка за достъп или към група от кооперациращи се точки. Целта на този подход е да се осигури оптимално и ефективно функциониране на кибер-физичната безжична система за достъп като потребителски ориентирана унифицирана безклетъчна мрежа за достъп, където плътността на точките за достъп е сравнима с тази на потребителите. В процеса на асоцииране оказват влияние не само свързаността и покритието, която всяка точка за достъп може да предостави и осигури, но и влияние й върху общата спектрална и енергийна ефективност на системата.

7. Разработен е модел за събиране на „големи RF данни", който дава възможност за прилагане на различни видове аналитики и е имплементирана на практика платформа за събирането на тези данни. Въведено е понятието „RF аналитика", което се свързва с обработката, анализа и извличането на знания от големи RF данни с различни цели. Разгледани са примери за приложение на дескриптивна, предсказателна и препоръчваща RF аналитики.

8. Предложен е алгоритъм за следене на спектъра, при който се постига оптимален компромис между скорост и точност. За целта е приложен хибриден подход, използващ едновременно енергиен детектор и размита логика. Алгоритъмът е имплементиран върху платформа за провеждане на практически експерименти за когнитивно радио, работещо в реално време. Направено е сравнение между така получените резултати и тези, в резултат на съответните аналитични или симулационни модели.

9. Предложен е подход за динамична и проактивна оптимизация на ефективността на работа и капацитета на кибер-физична безжична система за достъп като е използвана възможността за предсказване на потребителското поведение. Взето е под внимание разпределението, мобилността и активността на потребителите. Прогнозирането се осъществява чрез невронна мрежа, използваща данните от потребителската топлинна карта.

10. Предложен е подход за динамично управление на ресурси в кибер-физична безжична система за достъп. Използван е ролеви игрови подход с максимизиране на ползата. Ролите в игровия подход са дефинирани с помощта на невронен класификатор като се вземат предвид разпределението, местоположението и исканата пропускателна способност от потребителското оборудване в зоната на покритие на точките за достъп.

11. Предложен е подход за динамично и ефективно управление на ресурси в кибер-физична безжична система за достъп, базиран на анализ и моделиране на риска. В основата е имплементирането на проактивен механизъм за управление на смущенията на базата на обща процедура за коригиране на предавателната мощност и/или режима

на работа на точките за достъп в зависимост от взаимните смущенията, които потребителското оборудване могат да си причинят.

12. Предложен е метод за реализация на самоконфигурация, самоорганизация и самооптимизация и автономични функционалности в кибер-физична безжична система за достъп. Логиката на автономичността е поставена в отделна когнитивна равнина в операционната система за достъп до мрежата. Приложена е схема за машинно обучение, базирана на абстракция, модулност и йерархия, както и адаптация чрез обучение от предварително обработени данни, генерирани от мрежата.

13. Предложен е метод за самоконфигуриране и самоорганизиране на разпределението на ресурси в кибер-физична безжична система за достъп. Приложен е комбиниран алгоритъм, основан на Q-обучение подсилено с ролеви игрови подход. Използвани са познанията за разпределението и динамиката на потребителското оборудване, за да се предвиди очакваното им местоположение и се секторизира зоната на обслужване на точките за достъп като същевременно се отчита какви ресурси използва всяка точка за достъп и какви смущения се получават. На всеки сектор е назначена различна роля.

Изброените приноси правилно отразяват постигнатото от автора.

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

Резултатите от изследванията са представени в 35 авторски публикации. Проф. д-р инж. Владимир Пулков е самостоятелен автор в шест от тях, сред които един монографичен труд и две глави от книги, а в 12 – е първи или втори автор. Специфичният характер на изложението на съдържанието на дисертационния труд, както и наблюденията, които имам върху качеството на работа, ми дават основание да потвърдя личното участие на проф. Владимир Пулков в приносите.

7. Преценка на публикациите по дисертационния труд.

Представени са 35 авторски публикации, които отразяват научно-изследователската дейност на автора за периода от 2012 до 2019 г. Шест от публикациите са самостоятелни (един монографичен труд, две глави от книги, две публикации на международни конференции и една статия в списание с импакт фактор). От останалите 29 публикации, които са в съавторство, 12 са представени на международни конференции, 4 са глави от книги, 13 са в международни списания, от които 11 с импакт фактор и/или импакт ранг. Считам, че публикационната дейност е на високо научно ниво, преминала през критичния прочит на международни рецензенти и получила достатъчно популярност. За това говори изключително големия брой цитирания в световноизвестни бази данни (забелязани са 42 цитирания към месец Май 2019 г. само в базата данни на SCOPUS), както и много други в останалите бази данни. Представените авторски публикации, както и цитирания в базите данни само на SCOPUS многократно надхвърлят минималните национални изисквания, както и минималните изисквания на Технически университет – София за придобиване на научна степен „ДОКТОР НА НАУКИТЕ".

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.

В дисертационния труд са представени резултати, които са достъпни за обсъждане сред международната научно-изследователската общност, а също така са разпространени в световно известни научни бази данни SCOPUS и/или Web of Science. Предложените подходи, методи и алгоритми за предоставяне на повсеместна свързаност и ефективно управление на ресурси в потребителски ориентирани свръх плътни унифицирани безжични мрежи за достъп са практически приложими, което ми дава основание да считам, че ще намерят своето място в научната област и практиката, както и в дейността на мобилните оператори и доставчиците на услуги.

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 на дисертационния труд е разработен съгласно изискванията и отразява в необходимата степен основните постановки на дисертацията и следващите от тях резултати и изводи. Напълно адекватно са отразени основната цел, поставените и решени задачи в дисертационния труд, постигнатите резултати и приноси.

10. Мнения, препоръки и бележки.

Предоставеният за рецензия дисертационен труд е цялостен и завършен. Разработен е много прецизно, на изключително високо научно ниво, много добре е структуриран, обоснован и форматиран. Предложените нови подходи и алгоритми, както и постигнатите резултати са много добре представени аналитично, графично и таблично. Нямам съществени критични бележки към дисертационния труд. Дисертационният труд напълно съответства на изискванията за научна степен „ДОКТОР НА НАУКИТЕ“ съгласно ЗРАСРБ.

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

В дисертационния труд са представени научни изследвания, които имат безспорен научен, научно-приложен и приложен принос. От всичко казано до тук, смятам че както дисертацията, така и авторските научни публикации имат всички достойнства и напълно отговарят на изискванията на ЗРАСРБ и Правилника за прилагането му, а също и на Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени в Технически университет - София за присъждане на научната степен „ДОКТОР НА НАУКИТЕ”.

Общата ми оценка за предоставения за рецензия дисертационен труд е положителна и препоръчвам на уважаемото Научното жури да присъди на **проф. д-р инж. Владимир Пулков** научната степен „ДОКТОР НА НАУКИТЕ“ в професионално направление 5.3. Компютърна и комуникационна техника, научна специалност „Комуникационни мрежи и системи”.

Дата: 21.08.2019 г. **Подпис:**

/доц. д-р Камелия Николова/

REVIEW REPORT

On a doctoral dissertation for awarding

Scientific Degree „DOCTOR OF SCIENCE"
Professional Field 5.3 Communications and Computer Engineering
Scientific Specialty „Communication Networks and Systems"

Author of Dissertation: **Prof. Eng. Vladimir Poulkov, PhD**

Dissertation Topic: **Ubiquitous connectivity and effective resource management approach in user-centric ultra-dense unified wireless access networks**

Reviewer: Assoc. Prof. Eng. Kamelia Nikolova, PhD, Department of Communication Networks, Technical University of Sofia

1. Scientific and scientific-applied research topicality of the problem developed in the dissertation subject. Degree and levels of relevance of the problem and the specific tasks developed in the thesis.

Undoubtedly, the scientific field of the dissertation presented here is extremely relevant. With the development of telecommunication technologies over the last decade, the opportunity for full connectivity and access to communication resources of anyone or anything at anytime and anywhere has emerged. The continuous growth in the number of connected devices, different in technology and capabilities, the pursuit of ever-increasing speeds and variety of services and applications, and the increasing bandwidth requirements are posing new challenges not only to access networks, but also to the efficient radio resource management. There is a need to develop approaches to increase throughput, as well as to significantly reduce costs and energy consumption. Problems and challenges affecting the access to the network, the connectivity and the ability to transmit and process large volume of data generated by end users and devices, as well as lack of communication resources, complex electromagnetic environment, and interference will be particularly pronounced in dynamic communication scenarios, such as those in future smart cities, where mobile users and access nodes will be heterogeneous and with very high density per unit area. The dissertation is dedicated to solving these problems and is related to providing ubiquitous connectivity and efficient resource management in wireless access networks, characterized by extremely high density of both access points and end users regardless of their type, number per unit area and their movement.

2. Degree of the topic knowledge and creative interpretation of literary material.

The literature review made in the dissertation is extremely well structured and is based on 218 references, the majority of which from the last 10 years. It is very impressive not only their number and relevance but also the high level of competence, the creative interpretation, as well as how the information has been synthesized and summarized thus demonstrating a very thorough knowledge of the subject and its problems. Based on the critical analysis of the development of wireless access networks and the reported features and dynamics of communication scenarios in future smart cities, the main goal of the dissertation is formulated very precisely. The main aim can be summarized as follows: **development of new approaches to the implementation of**

access networks to provide seamless access and connectivity to the users, while enabling the implementation of methods for utilization and management of resource-constrained wireless access networks thus providing a visible "infinite capacity" of users, irrespective of their number per unit area and their movement. Three specific tasks have been defined for its implementation.

3. Consistency of selected research methodology with the dissertation purpose and tasks

I believe that a reasoned and appropriate choice has been made for the selected research methodology. Analytical, statistical and simulation approaches and analysis of big data have been used in the dissertation. All methods and models have been validated through simulation experiments, and the results of their practical implementation and testing have been analyzed in deep details.

4. Analytical summary of essence and evaluation of the material reliability serving as a basis for the contributions in the dissertation.

The dissertation has 193 pages including introduction, four chapters and conclusion; lists of figures, tables, abbreviations, author's publications and references. The content of the chapters is very well distributed and balanced. The dissertation content can be summarized as follows.

The development of access networks (ANs) is analyzed in Chapter 1. The concept of evolution of the ANs to networks based on a unified wireless access (UWA) is proposed. Their features and characteristics are analyzed. As a result, the main tasks of the dissertation are formulated, related to the proposition of: new schemes for association, grouping and cooperative communication of users and APs; new approaches to collecting, processing and analyzing RF data and contextualizing of the wireless access; new methods of efficient resource sharing and resource management.

New approaches for associating, grouping, and cooperative user and APs communications are proposed in Chapter 2. The approaches provide seamless, ubiquitous and uninterrupted connectivity to different types of user equipment in cyber physical wireless access system (CPWAS). For the implementation of association, grouping and cooperative communication schemes in CPWAS, two mandatory functionalities are proposed. Methods of proactive connectivity management and APs grouping are applied, and are implemented through heuristic algorithms with low computational complexity and simplified analytical calculations.

New approaches to the practical implementation in data cloud structures of radio frequency (RF) data processing and analysis, contextualization and prediction of user behavior are proposed in Chapther 3. The concept of "RF analytics" is introduced, reflecting the processing, analysis and extraction of knowledge from large volumes of RF data. Some experiments are also considered. A spectrum sensing algorithm offering an optimal compromise between speed and accuracy is proposed. An approach to dynamic and proactive optimization of CPWAS performance and capacity is proposed based on the ability to predict user behavior.

Chapter 4 proposes approaches for efficient resource management and the realization of self-configuration, self-organization and self-optimization (3S) functionalities in access network operating system (ANOS), with low computational complexity. A role game approach, proactive interference management mechanism and machine learning are applied.

Based on the above, I believe that the structure of the dissertation corresponds to its topic.

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

The dissertation submitted for review undoubtedly contains scientific, scientific-applied and applied contributions. I agree with the contributions listed in the conclusion from the author. They can be summarized as follows:

1. A critical analysis of the development of the ANs has been made based on which reasoned conclusions are drawn about its impossibility to meet the requirements imposed by a hyperlinked, diverse, and dynamic access scenario such as is the one in a smart cities (SCs) of the future.

2. The major characteristics of the access network in future smart cities are defined, based on which the concept of the structure and functionality of the access network and its evolution towards the so-called cell-less Unified Wireless Access (UWA) is introduced

3. A new approach to modeling and analyzing the performance of the UWA architecture is proposed. The approach follows the concepts of building and operation of large scale cyber physical system.

4. A model for proactive dynamic association of users and grouping of APs with low computational complexity based on the theory of graphs is developed. An objective function is defined and an optimization task is formulated. To solve the optimization task, a heuristic algorithm for association and grouping is proposed and developed, combining the advantages of Heuristic Concentration, Linear Programming and Graph Theory. Simulation experiments are performed.

5. A method for detecting and connecting communication nodes in large-scale, unstructured and resource-constrained environments with a view to collectively utilize the available resources is proposed. A heuristic approach based on a partnership model is applied. The main advantage of using such a heuristic approach is that it allows the definition of different performance indicators or metrics to facilitate the process of user association and providing connectivity in a dynamic system.

6. An approach for the association of one user to more than one AP or to a group of cooperating APs is proposed. The main purpose of such approach is to provide optimal and effective CPWAS functionality as a user-centric unified cell-less access network in which the density of APs is comparable to user density. The advantage of the proposed approach is that it uses criteria based on both the connectivity and coverage that each AP can provide, and ensure, as well as its impact on the overall spectral and energy efficiency of the system.

7. A model for collecting "*Big RF Data*" has been developed and a platform has been implemented in practice allowing for the use of different types of analytics. The concept of "*RF analytics*" is introduced, reflecting the processing, analysis and extraction of knowledge from big RF data for different purposes. Examples of descriptive, predictive, and prescriptive RF analytics are given.

8. A spectrum sensing algorithm offering an optimal compromise between speed and accuracy is proposed. The algorithm is based on a hybrid approach using simultaneously energy detection and fuzzy logic. The algorithm is implemented on a platform for real-time cognitive radio experiments. The results obtained are compared with those of relevant analytical or simulation models.

9. An approach to dynamic and proactive optimization of CPWAS performance and capacity is proposed based on the ability to predict user behavior. The approach takes into account the distribution, mobility and activity of users. Neural network using user heat map (UHM) data is used for the prediction.

10. An approach to dynamic resource management in CPWAS is proposed. A role-game approach with maximizing the reward is used. The roles in the game approach are defined using a neuron classifier, taking into account the distribution, location and required throughput of UEs in the APs coverage area.

11. An approach to dynamic and effective resource management in CPWAS based on risk analysis and risk modeling is proposed. In its core is the implementation of a proactive interference management mechanism based on a general procedure for adjusting the transmit power and/or operating mode of the APs, depending on the mutual interferences that UEs can cause each other.

12. A method of the realization of 3S and autonomic functionalities in CPWAS is proposed. The autonomy logic is placed in a single cognitive plane in ANOS. A machine-learning scheme based on abstraction, modularity and hierarchy, as well as adaptation by training from pre-processed data generated by the network are applied.

13. A method for self-configuration and self-organization of the resource allocation in CPWAS is proposed. A combined algorithm including Q-learning enhanced by a role-playing approach is applied. The knowledge of the distributions and dynamics of UEs is used to predict their location and to divide the APs service area into sectors while taking into consideration what resources each, AP uses and the interferences it receives. Different roles are assigned to the sectors.

The above listed contributions correctly reflect what the author has achieved.

6. Assessing the degree of the author's personal involvement in the contribution.

The results of the studies are presented in 35 author's publications. Prof. Vladimir Poulkov, PhD is a single author in six of them, including one monography and two book chapters, and in other 12 publications, he is the first or the second author. The specific nature of the presentation of the content in the dissertation, as well as the observations I have on the quality of his research and educational work, give me the reason to confirm the personal involvement of Prof. Vladimir Poulkov in the contributions.

7. Assessment of the dissertation publications.

35 author's publications within the period 2012 to 2019 are presented. In six of the research publications, Prof. Poulkov is a single author (one monography, two book chapters, two international conference papers, and one Impact Factor journal publication). The rest 29 co-authored publications can be classified as follows: 12 international conference papers, 4 book chapters, 13 international journal papers, 11 of which are with Impact Factors and/or Impact Ranks. I believe that the publishing activity is of a high scientific level, has been critically read by international reviewers and gained enough popularity. This is evidenced by the high number of citations in world-famous databases (42 citations are available in the SCOPUS database by May 2019). There are many other citations in databases such as WoS, Google Scholar, Internet, etc. The author's publications included in the dissertation, as well as the citations in the SCOPUS

databases, exceed many times the minimum national requirements, as well as the minimum requirements of the Technical University - Sofia for awarding the scientific degree of „DOCTOR OF SCIENCE".

8. Use of the dissertation results in scientific and social practice. Availability of direct economic effect, etc. Documents serving as basis for the claim.

The results presented in the dissertation are available for discussion among the international research community, and are available in SCOPUS and / or the Web of Science databases. The approaches, methods, and algorithms proposed to provide ubiquitous connectivity and efficient resource management in user-centric ultra-dense unified wireless access networks are practically applicable, which gives me the reason to believe that they will find their place in science and practice, and in the activities of mobile operators and service providers.

9. Compliance assessment of the dissertation extended abstract with the requirements for its preparation, and evaluation of the adequacy for presenting the dissertation fundamentals and contributions.

The dissertation extended abstract is developed according to the requirements and reflects to the necessary extent the main statements of the dissertation and the subsequent results and conclusions. The main purpose, the tasks set and solved in the dissertation, the achieved results and contributions are fully adequately reflected.

10. Comments, recommendations and remarks.

The dissertation submitted for review is comprehensive and complete. It is designed very precisely, at an extremely high scientific level, is very well structured, well-grounded and well formatted. The proposed new approaches and algorithms, as well as the results achieved, are very well presented analytically, graphically and tabularly. I have no significant critical comments on the thesis. The dissertation is fully compliant with the national requirements for a scientific degree "DOCTOR OF SCIENCE".

11. Conclusion with straightforward positive or negative dissertation assessment.

Scientific, scientific-applied and applied researches and results with an undoubtable contributions are presented in the dissertation. From all of the above, I believe that both the dissertation and the author's research publications have all the merits and fully meet the requirements of the Law for the development of the academic staff in the Republic of Bulgaria, the Regulations for its implementation, and the Regulations for the conditions and procedures for obtaining scientific degrees at the Technical University - Sofia for the award of scientific degree "DOCTOR OF SCIENCE".

My overall assessment of the dissertation submitted for review is positive and I recommend to the Honorable Scientific Jury to award **Prof. Vladimir Poulkov** a scientific degree "DOCTOR OF SCIENCE" in professional filed 5.3. Communications and Computer Engineering, scientific specialty "Communication Networks and Systems".

Date: 21.08.2019

Signature:

/Assoc. Prof. Eng. Kamelia Nikolova, PhD/