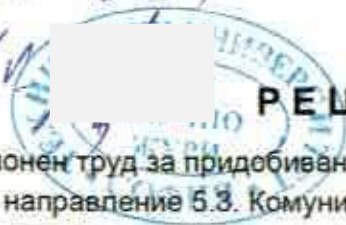


07278-НС1-084  
15.07.2024



## РЕЦЕНЗИЯ

върху дисертационен труд за придобиване на образователна и научна степен „Доктор“  
Професионално направление 5.3. Комуникационна и компютърна техника  
Научна специалност: Комуникационни мрежи и системи

Автор на дисертационния труд: маг. инж. Равиндър Бениуол

Тема на дисертационния труд: **ИЗСЛЕДВАНЕ НА АЛГОРИТМИ И ПРОТОКОЛИ ЗА КОМУНИКАЦИОННИ МРЕЖИ С ОГРАНИЧЕНИ РЕСУРСИ**

Рецензент: доц. д-р инж. **Габриела Атанасова**

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

Темата на дисертацията е изключително актуална, фокусирана върху алгоритми и протоколи за комуникационни мрежи с ограничени ресурси, които имат решаваща роля в бъдещото развитие на Интернет на нещата (IoT). Стандартът IEEE 802.15.4 дефинира физическия и каналния слой за безжични мрежи с малка консумация на енергия и сложност. Поради увеличената плътност на сензорните мрежови възли и необходимостта от свързване с други мрежи през интернет, Internet Engineering Task Force (IETF) определя IPv6 за прилагане на TCP/IP протокола за безжични персонални мрежи с малка мощност (LoWPAN). Освен това, едно от основните предизвикателства в такива безжични мрежи е механизмът за маршрутизиране поради ограничените възможности на възлите. Следователно, при избор на протокол за маршрутизиране трябва да се вземе предвид вероятността за успешно доставяне на пакети в съответствие с изискванията на приложенията.

Настоящият дисертационен труд е фокусиран върху изследване и подобряване на съществуващите методи за предоставяне на сигурност в безжични мрежи чрез използване на средства и подходи, заложен на физическия слой.

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

Представеният материал показва, че докторантът маг. инж. Равиндър Бениуол задълбочено е проучил голям брой от значимите научни публикации в областта на комуникационните мрежии с ограничени ресурси, по-специално протоколите за маршрутизиране в 6LoWPAN. Общият брой на цитираните литературни източници е 85, като повече от 90% от тях са публикувани през последните десет години, което



е следствие от актуалността на темата. Въз основа на това правилно са формулирани целта на дисертационния труд и задачите за нейното постигане.

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

Избраната от докторанта методика на изследване съответства на поставените в дисертационния труд задачи, като отчита сложността на разглеждания проблем.

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

Структурата на дисертационния труд съответства на темата му, отделните глави са добре балансирани по обем и притежават логическа обвързаност.

Дисертационният труд е разработен в обем от 135 стр., включващ 122 стр. основен текст с 79 фигури и 12 таблици. Структуриран е в следните части: увод, четири глави, заключение, справка за приносите по дисертационния труд, списък с публикации по дисертацията, списъци на използваните съкращения, фигури и таблици, и списък на използваната литература.

В **първа глава** е направен критичен анализ на изследвания проблем. Разгледана е необходимостта от IP свързаност в безжичните сензорни мрежи (WSN). Представено е сравнително изследване на технологиите за WSN. Специално внимание е отделено на маршрутизирането в 6LoWPAN, като са разгледани изискванията към маршрутизиращите протоколи, както и параметрите влияещи върху маршрутизирането в мрежи с ограничени ресурси. Прецизно е формулирана целта на дисертационния труд и задачите, които трябва да бъдат решени за постигането ѝ.

**Втора глава** е посветена на различните маршрутни протоколи в мрежите с ограничени ресурси. В нея е направено сравнение и анализ на най-популярните, както и наскоро предложените протоколи за маршрутизиране за 6LoWPAN мрежи: LOAD, MLOAD, DYMO-Low, Hi-Low, Extended Hi-Low, S-AODV и др. Предложена е нова класификация на протоколите за маршрутизиране, позволяваща по-лесно сравняване на характеристиките им.

В **трета глава** е изследван Multipath Multi-SPEED Routing Protocol за приложение в 6LoWPAN мрежи. Представен е сравнителен анализ на резултатите от проведените симулационни изследвания на SPEED, MMSPEED и HiLoW, имплементирани в 6LoWPAN мрежа по отношение на надеждност, закъснение, пропускателна способност и скорост на предаване.

**Четвърта глава** е посветена на енергийно ефективните протоколи за маршрутизиране в IoT мрежи с ограничени ресурси. Предложени и изследвани са



алгоритми за енергийно ефективен и надежден протокол за маршрутизиране на базата на MMSPEED за 6LoWPAN мрежи.

#### **5. Научни и/или научноприложни приноси на дисертационния труд.**

- Сравнително проучване и анализ на различни протоколи за маршрутизиране, предназначени за 6LoWPAN мрежи, въз основа на който е определено, че маршрутизиращите протоколите, предназначени за 6LoWPAN мрежи, могат да бъдат внедрени в мрежи с ограничени ресурси.
- Предложена е методика за адаптирането на MMSPEED маршрутизиращ протокол за 6LoWPAN мрежи и сравнителен анализ на резултатите от проведените симулационни изследвания на SPEED, MMSPEED и HiLoW, имплементирани в 6LoWPAN мрежа по отношение на надеждност, закъснение, пропускателна способност и скорост на предаване.
- Направен е сравнителен анализ на резултатите от MMSPEED, EMMSPEED и EMMSPED (с поддържане на мобилност) по отношение на закъснение, пропускателна способност и отпаднали възли, както и влиянието на няколко параметъра върху резултатите, свързани с производителността.

Считам, че тези приноси правилно отразяват постигнатото от автора в процеса на проведените изследвания и несъмнено ще намерят своята приложимост.

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

Излагането на материала в дисертацията, компетентно обосноваването изводи и научните публикации на маг. инж. Равиндър Бениуол ми дават основание да приема, че приносите в дисертацията са доминиращо негово дело.

#### **7. Преценка на публикациите по дисертационния труд.**

По материалите на дисертационния труд са представени **шест публикации**: от които една е публикувана в чуждестранно списание, в научната област на дисертацията и пет на конференции. Една от публикациите е самостоятелна, а в пет от публикациите инж. Равиндър Бениуол е водещ автор. Представен е списък с 10 цитирания на три от публикациите по дисертацията.

Считам, че работата е получила необходимата публичност. Същността и обема на направените публикации и доклади напълно отразяват разработените проблеми от дисертационния труд.

**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.**

Предложената методика и алгоритми за адаптирането на съществуващи маршрутизиращи протоколи, които могат да бъдат внедрени в мрежи с ограничени ресурси са практически приложими, което ми дава основание да считам, че те могат да бъдат използвани в други теоретични и приложни разработки в същата област.

**9. Мнения, препоръки и бележки.**

Предложеният ми за рецензиране дисертационен труд може да се определи като цялостен и завършен труд, разработен на много добро научно ниво, добре структуриран и оформен.

Нямам съществени забележки към работата.

Научната област на дисертацията е перспективна и моята препоръка към инж. Равиндър Бениуол е да продължи научната и приложната си работа по тази тематика.

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

В резултат на представените публикации и приноси в дисертационния труд смятам, че той съответства на изискванията на „Закона за развитие на академичния състав в Република България“, Правилника за неговото приложение и Правилника за условията и реда за придобиване на научни степени в Технически университет – София. Давам **положителна оценка** на дисертационния труд и предлагам на уважаемото Научно жури да присъди на **маг. инж. Равиндър Бениуол** образователната и научна степен „**доктор**“ по професионално направление 5.3 Комуникационна и компютърна техника, научна специалност „Комуникационни мрежи и системи“.

12.07.2024 г.  
гр. София

РЕЦЕНЗЕНТ:   
/доц. д-р инж. Габриела Атанасова/



QVW 78-101-084A  
15.07.2024



on doctoral thesis for awarding of an educational and scientific degree "Doctor"  
Professional field: 5.3 Communication and Computer Engineering  
Scientific speciality: Communication Networks and Systems

Author of the dissertation: **Ravinder Beniwal, M.Sc. Eng.**

Dissertation topic: **INVESTIGATION OF ALGORITHMS AND PROTOCOLS IN RESOURCE CONSTRAINED NETWORKS**

Reviewer: **Assoc. Prof. Gabriela [redacted] Atanasova, PhD Eng.**

**1. Relevance of the problem and the specific tasks developed in the doctoral thesis.**

The dissertation topic is highly relevant. It is focused on algorithms and protocols in resource-constrained networks that have a crucial role in the future development of the Internet of Things (IoT). Standard IEEE 802.15.4 defines physical and link layers for wireless networks with low power consumption and complexity. Due to the increased sensor network node density and the need to connect to other networks via the Internet, the Internet Engineering Task Force (IETF) defines IPv6 over low-power wireless personal area network (LoWPAN) as a technique to implement the TCP/IP protocol. Moreover, one of the main challenges in such wireless networks is the routing mechanism due to the limited capabilities of nodes. Hence, the design of the routing protocol must consider the probability of successfully delivering packets according to the requirements of applications.

The primary objective of the thesis is to modify and examine the routing algorithm for Internetworks, making it suitable for implementation in resource-constrained networks with limited memory, power, and computational capacity. The adapted algorithm should maintain the same level of accuracy, speed, efficiency, service differentiation, and probabilistic Quality of Service (QoS) guarantees, particularly in terms of timeliness and reliability

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

The PhD candidate has extensively studied significant scientific publications in the field of resource-constrained networks, in particular routing protocols in 6LoWPAN. The total number of cited literary sources is 85, more than 90% of them were published in the last ten years, which is a consequence of the actuality of the topic. Based on the adequate literature review, the aim of the dissertation was precisely formulated.



### **3. Consistency of the selected research methodology with the dissertation goal and tasks.**

The research methodology chosen by the doctoral student corresponds to the tasks set in the dissertation and takes into account the complexity of the problem under consideration.

### **4. Brief analytical description of the nature and assessment of the credibility of the material on which the contributions of the dissertation are based.**

The dissertation consists of 135 pages, with 122 pages of main text containing 79 figures and 12 tables. It is organized into the following sections: an introduction, four chapters, a conclusion, a summary of the contributions made in the dissertation, a list of publications related to the dissertation, a list of abbreviations, figures, and tables, and a list of references. The structure of the dissertation is well-balanced in terms of volume, and the individual chapters are logically interconnected with the topic.

The **first chapter** provides a critical analysis of the studied problem. The text discusses the need for IP connectivity in wireless sensor networks (WSNs) and presents a comparative study of WSN technologies. It gives special attention to routing in 6LoWPAN, considering the requirements for routing protocols and the parameters affecting routing in networks with limited resources. The text also precisely formulates the goal of the dissertation work and the tasks that must be solved to achieve it.

The **second chapter** is devoted to the various routing protocols in resource-constrained networks. It compares and analyzes the most popular and recently proposed routing protocols for 6LoWPAN networks: LOAD, MLOAD, DYMO-Low, Hi-Low, Extended Hi-Low, S-AODV, etc. A new classification of routing protocols is proposed, allowing an easy comparison of their characteristics.

The **third chapter** investigates the Multipath Multi-SPEED Routing Protocol for application in 6LoWPAN networks. A comparative analysis of the results of conducted simulation studies of SPEED, MMSPEED, and HiLoW implemented in a 6LoWPAN network in terms of reliability, delay, throughput, and transmission rate is presented.

The **fourth chapter** deals with energy-efficient routing protocols in resource-constrained IoT networks. Algorithms for an energy-efficient and reliable routing protocol based on MMSPEED for 6LoWPAN networks are proposed and investigated.

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

- A comparative study and analysis of various routing protocols designed for 6LoWPAN networks is presented. This analysis determines that the routing protocols for 6LoWPAN networks can be implemented in resource-constrained networks.



- A methodology for the adaptation of the MMSPEED routing protocol for 6LoWPAN networks and a comparative analysis of the results of the conducted simulation studies of SPEED, MMSPEED, and HiLoW implemented in a 6LoWPAN network in terms of reliability, delay, throughput, and transmission speed are proposed.
- A comparative analysis of the results of MMSPEED, EMMSPEED, and EMMSPEED (with mobility support) in terms of delay, throughput, and dead nodes, as well as the impact of several parameters on performance-related results, is performed.

These contributions correctly reflect what the author has achieved.

#### **6. Evaluation of the degree of personal participation of the PhD candidate.**

The exposition of the material in the dissertation, competently substantiated conclusions, and scientific publications of Eng. Ravinder Beniwal gives me a reason to assume that the contributions in the dissertation are his dominant work.

#### **7. Assessment of dissertation publications.**

The dissertation includes six publications: one published in an international scientific journal related to the dissertation's field and five presented at conferences. The PhD candidate is the sole author of one publication and the lead author of the remaining five. In addition, a list of 10 citations from three of the dissertation publications is provided.

All this shows that the work has received the necessary publicity. The nature and volume of the publications fully reflect the developed problems of the dissertation.

#### **8. Using the results of the dissertation work in scientific and social practice. Existence of achieved direct economic effect, etc. Documents on which the statement is based.**

The proposed methodology and algorithms according to the adaptation of existing routing protocols that can be implemented in networks with limited resources are practically applicable, which gives me reason to believe that they can be used in other theoretical and applied developments in the same field.

#### **9. Comments, recommendations, and remarks.**

The submitted for review dissertation is developed at a high scientific level, well structured, and well formatted.

I have no significant comments on the work.

The scientific field of the dissertation is promising, and my recommendation to Eng. Ravinder Beniwal is to continue his scientific research on this topic.

**Conclusion with a positive or negative dissertation assessment**

As a result of the presented publications and contributions in the dissertation, I believe that it meets the requirements of the "Law on the Development of the Academic Staff in the Republic of Bulgaria", the Regulations for its Application, and the Regulations for the Conditions and Procedures for Obtaining Scientific Degrees at the Technical University - Sofia. I give a positive assessment of the dissertation and propose to the Honourable Scientific Jury to award **Ravinder Beniwal, M.Sc. Eng.** educational and scientific degree "Doctor" in professional field 5.3 Communication and Computer Engineering, scientific speciality Communication Networks and Systems.

**12.07.2024**  
Sofia

**REVIEWER:**   
/Assoc. Prof. Gabriela Atanasova, PhD Eng./