

**ВІДГУК
ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

Глухова Валерія Сергійовича,

професора, доктора технічних наук, професора кафедри електронних
обчислювальних машин

Національного університету «Львівська політехніка»

на дисертаційну роботу Штільмана Павла Романовича на тему:

«Багаторівнева онтологія аналізу ризиків у бездротових сенсорних мережах»,

яку представлено на здобуття наукового ступеня доктора філософії

за спеціальністю 123 – Комп'ютерна інженерія

галузь знань 12 – Інформаційні технології

1. Актуальність теми дисертації

Актуальність дисертаційної роботи Штільмана Павла Романовича зумовлена необхідністю підвищення ефективності аналізу станів, вразливостей і ризиків у бездротових сенсорних мережах, які використовуються промислових кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних системах. Функціонування таких мереж супроводжується неповнотою вхідних даних, обмеженістю енергетичних ресурсів сенсорних вузлів, нестабільністю каналів зв'язку, впливом зовнішніх завад і можливою зміною топології системи. За таких умов особливого значення набуває своєчасне виявлення критичних станів компонентів системи, визначення слабких місць, оцінювання ризикових ситуацій і формування обґрунтованих рекомендацій щодо реагування.

У дисертації запропоновано комплекс моделей і методів, які поєднують нечітке моделювання, графо-атрибутивний опис структури бездротових сенсорних мережах (БСМ), онтологічні та семантичні описи структур, онтологічні бази даних, семантичне логування станів, аналіз вразливостей і узагальнене оцінювання ризику. Такий підхід дозволяє розглядати стан бездротової сенсорної мережі не лише через окремі технічні параметри, а як сукупність взаємопов'язаних структурних, контекстних, вразливих і ризикових ознак. Це обумовлює своєчасність обраної теми та її відповідність сучасним завданням комп'ютерної інженерії, пов'язаним із розробленням інтелектуальних засобів моніторингу, аналізу та підтримки прийняття

рішень у розподілених комп'ютерних системах.

2. Структура та обсяг дисертації

Дисертаційна робота має традиційну для кваліфікаційного наукового дослідження структуру та складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 216 сторінок, з яких 160 сторінок займає основний текст. У дисертації наведено 14 рисунків, 11 таблиць, список використаних джерел містить 109 найменувань, також робота доповнена 3 додатками.

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми, визначено мету і задачі дослідження, об'єкт, предмет та методи, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Також подано відомості щодо апробації, публікацій здобувача та особистого внеску автора.

У першому розділі проведено аналіз бездротових сенсорних мереж як об'єкта дослідження. У ньому розглянуто їхню структуру, особливості функціонування у промислових умовах, підходи до організації роботи, а також сучасні методи оцінювання надійності, безпеки, вразливостей і ризиків. У висновках до розділу визначено науково-прикладну задачу, на розв'язання якої спрямована дисертаційна робота.

У другому розділі подано математичні засади нечіткого моделювання компонентів БСМ. Зокрема, розглянуто підхід до формалізації систем із чіткими та нечіткими параметрами, побудовано нечітку модель сенсорного вузла з урахуванням станів його основних компонентів, а також нечіткі моделі сенсорного вузла, каналу зв'язку, що враховує пропускну здатність, затримки, доступність і старіння інформації.

У третьому розділі виконано розроблення онтологічної моделі та методів ризик-орієнтованого управління бездротовими сенсорними мережами. У межах цього розділу подано метод семантичного визначення та логування станів компонентів мережі, метод аналізу вразливостей, узагальнений метод оцінки ризику та метод адаптивного керування, орієнтований на формування рекомендацій щодо реагування на позаштатні ситуації.

У четвертому розділі наведено результати реалізації, впровадження та

імітаційного дослідження запропонованої моделі. Розглянуто архітектуру реалізації, процедури оцінювання контексту, вразливості й ризику, сценарії функціонування тестової БСМ, результати моделювання та порівняння запропонованого підходу з існуючими підходами до аналізу ризиків.

У загальних висновках узагальнено основні наукові та практичні результати дослідження.

Додатки містять матеріали, що підтверджують апробацію та практичне використання окремих результатів дослідження.

Анотація дисертації стисло відображає її основні положення.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані у дисертаційній роботі, мають належний рівень обґрунтованості. Це забезпечується послідовним аналізом сучасних досліджень у галузі бездротових сенсорних мереж, нечіткого моделювання, онтологічного подання знань, аналізу вразливостей та ризик-орієнтованого оцінювання. Обраний автором напрям дослідження логічно випливає з виявлених обмежень існуючих підходів, які не повною мірою враховують невизначеність, контекст функціонування, топологічну роль компонентів і взаємозв'язок між станами, вразливостями та ризиками БСМ.

Достовірність отриманих теоретичних результатів підтверджується коректним використанням математичного апарату нечіткого моделювання, графо-атрибутивного опису структури мережі, онтологічного представлення предметної області та формальних правил логічного висновку. Запропоновані моделі та методи є взаємопов'язаними і утворюють цілісну послідовність переходу від первинних телеметричних і топологічних даних до семантичного опису станів, виявлення вразливостей, оцінювання ризику та формування рекомендацій щодо реагування.

Обґрунтованість практичних результатів підтверджується проведенням імітаційним дослідженням тестової бездротової сенсорної мережі, а також матеріалами щодо впровадження окремих результатів дисертаційної роботи, наведеними у додатках. Це дозволяє вважати основні наукові положення, висновки

та рекомендації достатньо аргументованими й такими, що відповідають поставленій меті та задачам дослідження.

4. Практична значимість розроблених моделей та методів

Практична цінність дисертаційної роботи полягає у можливості застосування розроблених моделей і методів для підвищення ефективності аналізу стану бездротових сенсорних мереж, своєчасного виявлення їхніх вразливостей, оцінювання ризикових ситуацій та підтримки прийняття рішень під час експлуатації мереж у промислових умовах. Запропонований підхід може бути використаний у системах моніторингу, керування та диспетчеризації промислових кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних система на основі БСМ, де необхідно враховувати структурні особливості мережі, поточний контекст її функціонування, ресурсні обмеження та вплив зовнішніх чинників.

Практична значущість отриманих результатів підтверджується їх упровадженням у ТОВ «Інтелект Груп Компані», що засвідчено відповідною довідкою, наведеною у додатках дисертаційної роботи. Це свідчить про прикладну цінність запропонованих моделей і методів та можливість їх використання як інструменту підтримки прийняття рішень у задачах ризик-орієнтованого аналізу бездротових сенсорних мереж.

5. Новизна наукових положень, висновків та рекомендацій

У межах виконаного дослідження отримано такі наукові результати:

- отримала подальший розвиток спеціальна нечітка модель сенсорного вузла та каналу зв'язку бездротової сенсорної мережі, яка ґрунтується на графово-атрибутивних моделях структури мережі та нечітких оцінках станів вузлів і каналів. Модель відрізняється поетапним перетворенням багаторівневих параметричних характеристик у лінгвістично та семантично інтерпретовані стани, та формуванням зведених критеріїв оцінювання функціонального стану вузла та каналу зв'язку за енергетичними, часовими, навантажувальними та комунікаційними ознаками. Модель має більшу обчислювальну повноту (на 67 %) та точність (до 100 %), завдяки тому підвищує придатність специфікації сенсорної мережі до прискореного обчислювального аналізу вразливостей і ризиків та прийняття рішень в умовах

невизначеності, а також дозволяє створювати відповідний клас методів підтримки прийняття рішень щодо реагування на позаштатні ситуації;

- уперше розроблено інтегровану багаторівневу онтологічну модель аналізу бездротової сенсорної мережі, яка ґрунтується на графово-атрибутивних моделях структури мережі, нечітких оцінках станів компонентів мережі та спеціальної нечіткої моделі сенсорного вузла та каналу зв'язку бездротової сенсорної мережі. Модель має особливості багаторівневого онтологічного семантично узгодженого подання формалізованих вразливостей, ризикових факторів і адаптивного керування, побудови системи 30 зведених критеріїв їх оцінювання за структурними, контекстними, вразливими та ризиковими ознаками, узагальнення результатів аналізу для різних режимів функціонування мережі. Модель забезпечує більшу обчислювальну повноту (до 98,3 %), точність (до 100 %) та цілісність семантичної специфікації стану БСМ, а також дозволяє створювати відповідний клас методів підтримки прийняття рішень щодо реагування на позаштатні ситуації.;

- отримав подальший розвиток метод семантичного визначення та логування станів компонентів бездротових сенсорних мереж, який ґрунтується на інтегрованій багаторівневої онтологічній моделі та спеціальній нечіткій моделі сенсорного вузла та каналу зв'язку бездротової сенсорної мережі. Метод відрізняється багаторівневим семантичним поетапним визначенням та узгодженням телеметричних, топологічних і нечітко інтерпретованих характеристик компонентів сенсорної мережі, а також формуванням формалізованого онтологічного подання поточного стану компонентів мережі. Метод дозволяє з більшою обчислювальною точністю (до 100 %) формувати як багаторівневе детальне, так й за зменшений обчислювальний час (на 15 %) отримати узагальнене подання поточного стану БСМ й зведений критерій оцінювання станів БСМ за структурними, контекстними та функціональними ознаками для логічного висновку, виявлення вразливостей, подальшого оцінювання ризику та прийняття рішень;

- удосконалено метод аналізу вразливостей бездротових сенсорних мереж, який ґрунтується на інтегрованій багаторівневої онтологічній моделі та спеціальній нечіткій моделі сенсорного вузла та каналу зв'язку бездротової сенсорної мережі. Метод відрізняється використанням спеціалізованих правил поетапного виявлення

критичних станів на основі формальних правил нечіткого логічного висновку, семантичних онтологічних залежностей між компонентами мережі та контекстно залежних ознак їх функціонування, що дозволяє формувати зведений критерій оцінювання вразливості компонентів БСМ за структурними, контекстними, топологічними та середовищними ознаками. Метод дає змогу за менший обчислювальний час (на 20 %) виявляти критичні стани, слабкі місця мережі та формувати основу для подальшої оцінки ризику й прийняття рішень;

- отримав подальший розвиток узагальнений метод оцінки ризику в бездротових сенсорних мережах, який ґрунтується на інтегрованої багаторівневої онтологічній моделі та спеціальної нечіткої моделі сенсорного вузла та каналу зв'язку бездротової сенсорної мережі. Метод відрізняється поетапним семантичним інтегруванням результатів аналізу вразливостей, контексту поточного стану мережі, факторів середовища, зовнішніх впливів і структурної ролі компонентів у межах єдиного формального ризикового подання, а також формуванням зведеного критерію оцінювання ризику компонентів і сегментів БСМ за вразливими, контекстними, середовищними та структурно-пріоритетними ознаками. Метод забезпечує з меншим обчислювальним часом (на 22 %) побудову карти ризиків і створює основу для вибору доцільних контрзаходів, щодо реагування, й прийняття рішень.

6. Рекомендації щодо використання результатів дисертації

Результати, отримані у дисертаційній роботі, доцільно використовувати під час розроблення та вдосконалення засобів моніторингу, аналізу й підтримки прийняття рішень у промислових кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних системах на основі бездротових сенсорних мереж. Запропоновані моделі та методи можуть бути застосовані для формалізованого подання стану вузлів і каналів зв'язку, аналізу вразливостей, оцінювання ризикових ситуацій, побудови карти ризиків і формування рекомендацій щодо реагування на позаштатні стани.

Окремі положення дисертаційної роботи можуть бути використані в освітньому процесі під час викладання дисциплін, пов'язаних із комп'ютерними мережами, кіберфізичними системами, бездротовими сенсорними мережами, онтологічним моделюванням, інтелектуальними системами моніторингу, нечіткими моделями та ризик-орієнтованим аналізом

7. Повнота викладу в наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації, відсутність порушення академічної доброчесності

Основні положення дисертаційної роботи та результати її практичного застосування були представлені й обговорені на міжнародних і всеукраїнських наукових та науково-практичних конференціях, зокрема:

- II International Scientific and Practical Conference «Research work in the system of training teachers in technological fields». Berlin, Germany, January 2024;
- X Міжнародна науково-практична конференція «Інформатика. Культура. Техніка», Одеса, Україна, вересня 2024;
- Modern Information Technology 2025/Сучасні Інформаційні Технології 2025. / Національний університет «Одеська політехніка». – Одеса, 2025;
- The 13th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications 4-6 September, 2025, Gliwice, Poland;
- The XIII International Scientific-Practical Conference «Information Control Systems and Technologies» (ICST- ODESA – 2025) 24th – 26th September, 2025;
- XI Міжнародна науково-практична конференція «Інформатика. Культура. Техніка», Одеса, Україна. Жовтень 2025;
- The 15th IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT'2025 19-21 December, 2025, Athens, Greece.

Результати дисертаційної роботи достатньо повно висвітлено у 12 наукових публікаціях здобувача. Серед них 5 статей у наукових фахових виданнях України, зокрема 3 статті у виданнях категорії «Б», 1 стаття у виданні категорії «А», що індексується у наукометричній базі Scopus, а також 1 публікація у працях міжнародної наукової конференції, що індексується у Scopus. Крім того, результати дослідження відображено у 7 публікаціях у працях і матеріалах міжнародних наукових конференцій. Таким чином, публікаційний доробок здобувача відповідає чинним вимогам до оприлюднення результатів дисертаційної роботи.

Зміст опублікованих праць узгоджується з темою дисертації та охоплює її основні результати: нечітке моделювання компонентів бездротових сенсорних

мереж, побудову багаторівневої онтологічної моделі і методів (семантичне логування станів, аналіз вразливостей, оцінювання ризиків), формування рекомендацій щодо реагування, реалізація, впровадження та порівняльний аналіз багаторівневої онтологічної моделі БСМ. Це підтверджує належну повноту викладу результатів дисертаційного дослідження у наукових публікаціях.

Публікація результатів у рецензованих наукових виданнях і матеріалах конференцій, що передбачають попередній розгляд поданих матеріалів, є одним із підтверджень дотримання принципів академічної доброчесності. За результатами ознайомлення з дисертаційною роботою порушень академічної доброчесності не виявлено. Подана робота є самостійним науковим доробком здобувача.

8. Зауваження згідно змісту та оформлення дисертаційної роботи

1. У другому розділі при побудові нечітких моделей сенсорного вузла та каналу зв'язку доцільно було б детальніше пояснити зв'язок нечіткої логіки та нечітких чисел, зв'язок кількості лінгвістичних термів і параметрів функцій належності, похибки переходу до лінгвістичних термів, дії при виникненні особливих ситуацій типу «переповнення» під час операцій над трикутними нечіткими числами.

2. У роботі не пояснено, яким чином визначаються вагові коефіцієнти у формулах оцінювання вразливості та ризику, а також чи можуть вони змінюватися залежно від призначення мережі, типу контрольованого об'єкта або умов експлуатації.

3. У частині адаптивного керування доцільно було б чіткіше показати послідовність вибору рекомендованого контрзаходу за наявності кількох можливих варіантів реагування для одного ризикового стану, зокрема з урахуванням рівня ризику, типу вразливості та поточних ресурсних обмежень.

4. У запропонованих моделях і методах не згадано джерела завад, не враховано обмежену надійність елементів системи, вичерпання їхнього ресурсу, не враховано можливе дублювання функцій елементів БСМ, і, як наслідок, не враховано можливість організації робочого діагностування.

5. У п. 3.2.1 відсутні чіткі посилання на сторінки Розділу 2, де наведено результати моделювання.

6. У Розділі 4 не наведено схему БСМ, яка досліджується. Результати імітаційного дослідження наведено для тестової бездротової двосенсорної мережі. Доцільно було б розширити набір сценаріїв перевірки, зокрема розглянути випадки одночасного погіршення кількох параметрів мережі: зниження енергетичного ресурсу вузлів, збільшення затримки передавання, зростання втрат пакетів і впливу зовнішніх завад, у тому числі і при збільшенні кількості сенсорів.

7. У Висновках наведено дані про зменшення обчислювального часу за рахунок запропонованих методів, але методи отримання цих даних у попередніх розділах не розкрито.

8. При викладенні математичного апарату роботи бажано було б подати окрему узагальнювальну таблицю умовних позначень, індексів і змінних, що використовуються у формулах другого та третього розділів.

9. У роботі зустрічаються помилки, які можна вважати механічними, особливо у математичних формулах, наприклад, 2.9 – один операнд замість кількох, 2.24 – 2.26 – пропущено знак «=», на роботи 106, 107, 108 відсутні посилання у тексті, механічний переклад термінів одно- та багатогоповий.

Наведені зауваження мають дискусійний і рекомендаційний характер, спрямовані на уточнення окремих положень, покращення подання матеріалу та розширення можливостей подальшого розвитку запропонованих моделей і методів. Вони не ставлять під сумнів основні наукові результати дисертаційної роботи, не знижують її теоретичної значущості та практичної цінності, а також не впливають на загальну позитивну оцінку проведеного дослідження.

9. Загальний висновок

Дисертаційна робота Штільмана Павла Романовича «Багаторівнева онтологія аналізу ризиків у бездротових сенсорних мережах» є самостійною та завершеною кваліфікаційною науковою працею, у якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що мають теоретичне і практичне значення для галузі інформаційних технологій. Тематика, зміст і спрямованість дисертації відповідають спеціальності 123 «Комп'ютерна інженерія».

У роботі розв'язано актуальне науково-прикладне завдання, пов'язане з розробленням моделей і методів аналізу ризиків у бездротових сенсорних мережах.

Отримані результати можуть бути використані в організаціях, науково-дослідних установах і підприємствах, що займаються створенням та експлуатацією систем моніторингу, ризик-орієнтованого аналізу, підтримки прийняття рішень і керування промисловими бездротовими сенсорними мережами.

Зміст дисертаційної роботи, рівень обґрунтованості наукових положень, повнота викладення результатів у публікаціях, практична спрямованість отриманих результатів і відсутність порушень академічної доброчесності дають підстави вважати, що дисертація відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Вважаю, що Штільман Павло Романович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 123 «Комп'ютерна інженерія», галузь знань 12 «Інформаційні технології».

Офіційний опонент,
професор, доктор технічних наук, професор
кафедри електронних обчислювальних машин
Національного університету
«Львівська політехніка»



Валерій ГЛУХОВ