



**ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ**

**Машиностроителен факултет**

**Катедра " Автоматизация на дискретното производство "**

**маг. инж. Чен Тонян**

# **Приложение на интелигентни сензори с 5G комуникация в индустрията**

## **АВТОРЕФЕРАТ**

**на дисертация за придобиване на образователна и научна  
степен**

**"ДОКТОР"**

**Област: 5. Технически науки**

**Професионално направление: 5.1 „Машинно инженерство“**

**Научна специалност: „Автоматизирани системи за обработка на  
информация и управление“**

**Научен ръководител: проф. д-р инж. Панчо Томов**

**СОФИЯ, 2025 г.**

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра "Автоматизация на дискретното производство" към Машиностроителен факултет на ТУ-София на редовно заседание, проведено на 09.06.2025 г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на 13.10.2025 г. от 13,00 часа в Конферентната зала на БИЦ на Технически университет - София на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-5.1-71/16.06.2025 г. на Ректора на ТУ-София в **състав:**

1. проф. д-р инж. Любомир Ванков Димитров – председател
2. доц. д-р инж. Велизар Велизаров Захаринов - научен секретар
3. проф. д-р инж. Димитър Дамянов Дамяновски
4. проф. д-р инж. Николай Иванов Стоименов
5. доц. д-р инж. Иванка Василева Пеева

Рецензенти:

1. проф. д-р инж. Любомир Ванков Димитров
2. проф. д-р инж. Димитър Дамянов Дамяновски

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Машиностроителния факултет на ТУ-София, блок № 3, кабинет № 3242

Дисертантът е редовен докторант към катедра "Автоматизация на дискретното производство" на Машиностроителен факултет на ТУ-София.

Изследванията по дисертационната разработка са направени от автора.

Автор: маг. инж. Чен Тонян

Заглавие: Приложение на интелигентни сензори с 5G комуникация в индустрията

Тираж: 30 броя

Отпечатано в ИПК на Технически университет – София

## **I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД**

### **Актуалност на проблема**

Актуалността на тематиката на предложения дисертационен труд се определя от революционното навлизане на дигиталните технологии във всички сфери на съвременния живот, и особено в индустриалните процеси. Дигиталната трансформация на индустриалните процеси се обуславя все повече от интеграцията на интелигентни сензори и 5G комуникационни технологии. Такава интеграция позволява да се оптимизират индустриалните операции, да се подобри мониторинга в реално време и да се повиши ефективността на вземането на решения.

### **Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване**

На базата на обзора на литературните източници, са формулирани 3 основни проблема, които ще се разглеждат в дисертационния труд. На основата на тези “основни проблеми” се дефинират задачи, които трябва да се решат за постигане на целите поставени в дисертацията.

Формулирани са две цели на дисертацията както следва

Цел 1: Подобряване на качеството и скоростта на събиране на индустриални данни чрез 5G интелигентни сензори (Enhance Industrial Data Collection Quality and Speed via 5G Smart Sensors);

Цел 2: Улесняване на безпроблемната интеграция на 5G интелигентни сензори в съществуващи индустриални системи (Facilitate Seamless Integration of 5G Smart Sensors into Existing Industrial Systems).

### **Научна новост**

Предложеният дисертационен труд разглежда актуален въпрос, като предлага усъвършенствани сензорни конструкции със самокалибриране и възможности за предварителна обработка на локални данни, алгоритми за динамично разпределение на спектъра за ефективно използване на 5G мрежата и интегрирани рамки за анализ на големи данни за ефективно управление на генерираните от сензори данни.

### **Практическа приложимост**

5G умните сензори значително подобряват точността на събиране на данни (грешка намалена до 3.1%) и скоростта на предаване (350 Mbps) в индустриални сценарии, но срещат предизвикателства като несъвместимост на протоколи (60% от предприятията), високи разходи (40% от бюджета на МСП за оборудване) и адаптация към сложна среда (отслабване на сигнала с 30–50% при висока температура). Казус в автомобилното производство отчита увеличение на производителността с 30–40% и намаляване на логистичните разходи с 20–25%, потвърждавайки приложимостта на технологията.

### **Апробация**

Настоящото изследване разглежда бъдещите приложения на 5G интелигентните сензори в индустриалната автоматизация, логистиката и енергийния мениджмънт. В интелигентните фабрики сензорите позволяват управление в реално време с висока

прецизност. В логистиката 5G сензорите осигуряват проследяване в реално време и оптимизация на маршрутите. Прогнозираните подобрения включват: увеличение на производствената ефективност с 30%–40%, намаляване на дефектите с 20%–30%, съкращаване на времето за доставка с 25%–35% и намаляване на енергийното потребление с 15%–20%. Чрез симулационни експерименти и реални казуси се потвърждава ефективността на 5G интелигентните сензори за повишаване на производствената ефективност, оптимизиране на разпределението на ресурсите и подобряване на качеството на продуктите.

### **Публикации**

Основни постижения и резултати от дисертационния труд са публикувани в 3 броя самостоятелни научни статии, от които една е в списание Автоматизация на Дискретното Производство Брой 6 юли 2024 г., Издателство на ТУ-София ISSN: 2682-9584 и две в списание SCIENTIFIC ATLAS, 2025, ISSN 2738-7518.

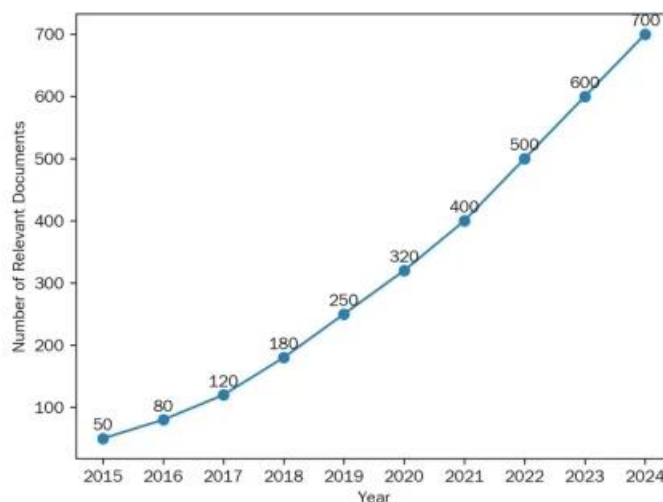
### **Структура и обем на дисертационния труд**

Дисертационният труд е в обем от 161 страници, като включва увод, 5 глави за решаване на формулираните основни задачи, списък на основните приноси, списък на публикациите по дисертацията и използвана литература. Цитирани са общо 169 литературни източници, като 158 са на латиница и 0 на кирилица, а останалите са интернет адреси. Работата включва общо 34 фигури и 40 таблици. Номерата на фигурите и таблиците в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

## II. Въведение

### II.1 Изследователска обосновка и мотивация

На фона на ускореното преобразяване на световната икономика и бързото развитие на науката и технологиите, дигиталната трансформация на индустриалния сектор се превръща в необратима тенденция. Предимствата на традиционните производствени модели по отношение на ефективност, гъвкавост и прецизност постепенно се изместват, тъй като информационните технологии дълбоко се интегрират с индустриалното производство, пораждайки нови модели на индустриална работа, характеризиращи се с интелигентност, автоматизация и подход, основан на данни. Сред тях интеграцията на интелигентни сензори и 5G комуникационни технологии е от ключово значение за дигиталната трансформация на индустрията. Броят на научните публикации по темата се увеличава от 50 през 2015 г. до 700 през 2024г(Фигура I-1). Тази впечатляваща тенденция на растеж отразява високото ниво на внимание и изследователски интерес както в академичните, така и в индустриалните среди. По отношение на областите на приложение, производствената индустрия (40%), енергийният сектор (25%), логистиката (15%) и химическата промишленост (10%) са основните изследователски фокуси, което подчертава спешната нужда на различни индустриални сценарии от мониторинг в реално време, прецизен контрол и ефективно управление. Въпреки това, предизвикателства като сложността на техническата интеграция (несъвместими интерфейси и протоколи на устройствата), рискове за мрежовата сигурност (заплахи от изтичане и атаки на данни) и проблеми със съвместимостта на оборудването (различия в стандартите между устройства на различни производители) ограничават широкото приложение на тази технология.



Фигура I-1. Тенденция в растежа на броя на релевантната литература за интелигентни сензори и 5G комуникация в индустриалната сфера

### II.2 Общ преглед на изследователските въпроси и методи

В отговор на основните предизвикателства пред традиционните индустриални системи за мониторинг и управление, включително латентност на комуникацията (например закъснението при предаване на данни от сензори в стоманодобивни заводи може да достигне десетки милисекунди, което води до увеличение на дефектите със 3–5%), тесни места при обработката на данни (обемът на данните в индустриалния интернет на нещата се очаква да достигне 79,4 зетабайта (ZB) през 2025 г., а закъснението при обработка на традиционните

платформи може да продължи с часове), както и недостатъчна точност и надеждност на сензорите (отклонения на измерванията в сложни среди), настоящото изследване използва мултидименсионален подход. Систематично се преглежда литературата за изясняване на технологичния контекст и пропуските в знанията, изграждат се модели на базата на теорията на опашките и информационната теория за количествено определяне на закъснението при предаване на данни и надеждността, и решенията се валидират чрез комбинация от лабораторни симулации (OMNeT++ мрежова симулация, MATLAB симулация на обработка на данни) и индустриални полеви експерименти. Конкретните изследователски направления включват проектиране на адаптивни сензори с възможности за предварителна обработка, оптимизация на динамичното разпределение на спектъра за 5G мрежи и интеграция на edge computing, както и индустриална рамка за управление на данни, базирана на big data и машинно обучение. Тези усилия целят да подобрят реалновременната работа, надеждността и ефективността на вземане на решения в индустриалните системи.

### **II.3 Структура на дисертацията**

Като въведение, Глава 1 разглежда изследователския контекст и мотивацията, посочва основните проблеми на съществуващите индустриални технологии в процеса на дигитална трансформация, представя използвания изследователски метод, съчетаващ теоретично изследване, преглед на литературата и симулационни експерименти, и очертава цялостната структура на дисертацията. Следващите глави са организирани както следва: Глава 2 анализира текущото състояние на индустриалните технологии и свързаните с тях теории; Глава 3 изяснява изследователските въпроси, цели и значимостта на изследването; Глава 4 описва подробно експерименталния дизайн и методите за симулация; Глава 5 представя резултатите и анализа на изследването; Глава 6 предлага решения и демонстрира тяхната стойност; Глава 7 обобщава ограниченията на изследването и очертава бъдещите насоки. Цялата дисертация се фокусира върху техническите предизвикателства и пътищата за приложение на интеграцията на интелигентни сензори и 5G, предоставяйки теоретична подкрепа и практически насоки за дигиталната трансформация на индустрията.

### III. Текущо технологично състояние

#### III.1 Дискретно индустриално производство

Традиционният модел на дискретно производство заема значима позиция в индустриалното развитие, но неговите ограничения стават все по-очевидни в условията на глобализация и пазарни промени. На ниво организация на производството съществуват проблеми с комплексната координация на процесите и лошото информационно взаимодействие. Например, при производството на автомобили, закъсненията в комуникацията между различните цехове водят до забавяния в производствения процес (виж Фигура 2-1). Моделът на пакетно производство намалява разходите, но жертва гъвкавостта, което затруднява посрещането на индивидуалните изисквания на клиентите. По отношение на производствената ефективност, средното време на престой на оборудването е 30%–40% (виж Таблица 2-1), а липсата на механизми за мониторинг в реално време често води до голям брой дефектни изделия вследствие на неизправности в оборудването. На ниво контрол на качеството, многостепенното производство увеличава разходите за проследяване на проблемите с качеството. Например, едно проследяване на качеството при производството на облекло изисква десетки часове труд и стотици долари ресурс (виж Таблица 2-2).



Фигура 2.1 Диаграма на производствения процес

Таблица 2.1: Дял на времето на престой на оборудването в традиционните дискретни производствени предприятия

| Причини за бездействие | Sub - Причини          | Дял на времето на празен ход (%) |
|------------------------|------------------------|----------------------------------|
| Оборудване - свързано  | Механична повреда      | 18                               |
|                        | Електрическа повреда   | 12                               |
| Материал - свързан     | Забавяне на доставчика | 15                               |

|                                        |                                    |    |
|----------------------------------------|------------------------------------|----|
|                                        | Проблем с качеството на материала  | 10 |
| Планиране на производството - свързано | Промяна на поръчката               | 14 |
|                                        | Грешка в прогнозата                | 9  |
| Човек - свързани                       | Обучение на операторите            | 7  |
|                                        | Недостиг на персонал               | 5  |
| Външни фактори                         | Прекъсване на електрозахранването  | 5  |
|                                        | Въздействие на природните бедствия | 5  |

Таблица 2.2: Случаи на проблеми с качеството на готовите облекла и ресурси, изразходвани за проследяване на първопричините

| Случай №. | Проявление на проблема с качеството | Човеко часове, прекарани в проследяване | изразходвани материални ресурси                             | Време, прекарано в проследяване |
|-----------|-------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| 1         | Прекалено много разхлабени нишки    | 10 часа                                 | Инструменти за проверка на стойност 200 USD                 | 2 дни                           |
| 2         | Отклонение на размера               | 15 часа                                 | Проби от тъкани на стойност 300 долара за повторно тестване | 3 дни                           |
| 3         | Разлика в цветовете                 | 8 часа                                  | 150 долара за проби от багрила за анализ                    | 1,5 дни                         |

### III.2 Трансформации в моделите на индустриална дейност

Индустриалната дигитализация води до цялостен ъпгрейд на моделите на работа:

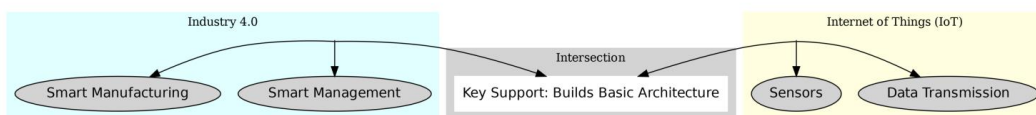
Производствените процеси постигат взаимна свързаност на оборудването и интелигентно управление чрез IoT технологии. Например, дигиталното производство в автомобилната индустрия значително намалява дела на дефектите. Управлението и вземането на решения разчитат на анализ на големи данни за мониторинг в реално време и научно планиране – корпоративната платформа на Siemens повишава ефективността на операциите. Взаимодействието по веригата на доставки елиминира информационните бариери чрез облачни изчисления; платформата на Zara увеличава скоростта на реакция с 20%–30%. Обслужването на клиенти позволява персонализирани решения чрез анализ на данни – Philips



използва потребителски данни за оптимизиране на потребителското преживяване в интелигентния дом.

### III.3 Индустрия 4.0 и Интернет на нещата (IoT)

Индустрия 4.0, с фокус върху интелигентното производство, разчита на IoT за изграждане на „човек-машина-вещ“ взаимосвързана архитектура. IoT позволява събиране и анализ на данни в реално време чрез сензори и комуникационни технологии, като увеличава ефективността на автомобилното производство с 30% в автоматизацията, постига 95% точност при ранно предупреждение за повреди на оборудването в петрохимическата промишленост чрез дистанционен мониторинг, и намалява разходите с 15%–20% чрез оптимизация на логистичните маршрути в умната логистика. Въпреки това, технологичните приложения са изправени пред заплахи за киберсигурността (например изтичане на данни след хакерски атаки) и проблеми със съвместимостта на оборудването (разлики в протоколите между производителите увеличават разходите за системна интеграция с 30%).



Фигура II-4. Връзка между Индустрия 4.0 и Интернет на нещата

Чрез интелигентни производствени методи и ефективно разпределение на ресурсите се реализира трансформацията и модернизацията на индустриалното производство [58]. Интернет на нещата (IoT), която е основна подпомагаща технология за Индустрия 4.0, изгражда нейната базова архитектура и предоставя фундаментални условия за реализирането на Индустрия 4.0 [40].

Умното производство е основната същност на Индустрия 4.0. Интелигентното производство означава използване на усъвършенствано автоматизирано оборудване, интелигентни сензори и технологии за изкуствен интелект с цел постигане на автоматизиран и интелигентен контрол върху производствения процес. Мрежовото сътрудничество акцентира върху споделянето на информация и съвместната работа между различни отдели в предприятието, както и между самите предприятия, посредством мрежата. IoT също така позволява автоматизирана съвместна работа между устройствата, повишавайки цялостната ефективност на производствената система. В автоматизираните производствени линии различните устройства могат да обменят информация и да си сътрудничат чрез IoT. Когато дадено устройство се повреди, останалите устройства могат автоматично да коригират производствения план, за да се гарантира непрекъснатостта на производството [58].

Прилагането на IoT технологии също така позволява на предприятията да осъществяват интелигентно управление на веригата за доставки. Чрез проследяване на логистичната информация за суровините и продуктите в реално време, функционирането на веригата за доставки може да бъде оптимизирано, разходите за складови наличности да бъдат намалени, а скоростта и ефективността на реакцията на веригата за доставки да се повишат [45].

### **III.4 Устойчивост на индустрията**

Индустриалната устойчивост се постига чрез координация между опазване на околната среда, икономическо развитие и социален прогрес:

От екологична гледна точка, Volkswagen намалява енергопотреблението с 20%–30% чрез интелигентни енергийни системи, а Novo Nordisk намалява емисиите с 30% с помощта на биотехнологии. В икономически план, lean производството на Toyota увеличава използването на суровини с 15%–20%, а наноматериалите на Dow Chemical намаляват енергийните разходи на сградите с 20%–30%. Социално, индустрията за електромобили създава над 10 милиона работни места, а преработвателните предприятия в селските райони на Индия увеличават доходите на фермерите с 30%. 5G и умните сензори имат ключова роля в енергоспестяването (напр. 15% намаление при Dow Chemical), намаляване на емисиите (напр. 30% намаление на SO<sub>2</sub> при ArcelorMittal), и повишаване на качеството (10%–15% увеличение на добива на чипове).

### **III.5 Преглед на литературата**

Съществуващите изследвания показват, че 5G умните сензори могат да намалят латентността на комуникациите с 80% и да повишат производствената ефективност с 30% в автоматизацията, както и да съкратят времето за логистична дистрибуция с 20%–30%. Въпреки това, остават значителни изследователски празноти: В сложни индустриални среди (напр. висока температура и прах) 5G сигналите отслабват с 60%–70%, а точността на сензорите намалява с 30%–40%. Липсва цялостен анализ на разходите, включващ екологични и социални аспекти. Интеграцията с наследени системи е затруднена от протоколни бариери (напр. Modbus/Profibus). В областта на сигурността липсват адекватни модели за оценка на риска в индустриални сценарии. Бъдещите изследвания трябва да засилят полевите експерименти, да изградят многомерни модели на разходите, да разработят универсален междинен софтуер и да подобрят технологиите за защита на поверителността (например хомоморфно криптиране).

### **III.6 Анализ на проблемите и дефиниране на целите на дисертацията**

#### **III.6.1. Анализ на проблемите**

На фона на дигиталната трансформация на индустрията, 5G умните сензори като ключова технология имат особено значение за повишаване на производствената ефективност и оптимизация на ресурсите. Въпреки това тяхното приложение все още е изправено пред редица основни въпроси, които изискват спешно решение:

**Проблем 1:** Как 5G умните сензори могат ефективно да подобрят качеството на индустриалното събиране на данни? Тази цел се фокусира върху влиянието на смущаващи фактори като електромагнитни полета, температура и вибрации в индустриалната среда върху точността на данните.

**Проблем 2:** Как могат 5G умните сензори да ускорят процеса на събиране на данни в индустриална среда, за да се посрещнат изискванията за реалновременност в производството? Тук се изследват ограничения като латентността и пропускателната способност на 5G мрежата.

**Проблем 3:** Анализ на пречките и стратегиите за интегриране на 5G умните сензори в съществуващите индустриални системи, обхващащи предизвикателства като несъвместими

комуникационни протоколи, различия във форматите на данните, киберсигурност и рентабилност на широкомащабното внедряване.

### **III.6.2. Цели на Дисертацията**

- **Подобряване на качеството и скоростта на индустриалното събиране на данни чрез 5G умни сензори**

**Краткосрочно:** Създаване на симулирани индустриални сценарии (напр. автомобилна производствена линия с електромагнитни/температурни/вибрационни смущения), за валидиране на точността при събиране на данни (чрез сравнение на показанията на сензорите с референтни стойности) и стабилността на предаване (чрез измерване на латентност и пропускателна способност). Вземане на референции от рамката за цялостност на данните на Yao et al. (2022) и изискванията за високоскоростно предаване по 5G на Attar et al. (2022).

**Дългосрочно:** Оптимизиране на технологии за противодействие на смущенията при сензорите (включително опит от Fraunhofer Institute за 5G в индустрията) и на 5G протоколи с цел постигане на  $\geq 99\%$  точност на данните и  $< 10$  ms латентност дори при екстремни условия, подкрепящи високи изисквания в сектори като аерокосмическата и полупроводниковата индустрия.

- **Осигуряване на безпроблемна интеграция на 5G умни сензори със съществуващите индустриални системи**

**Краткосрочно:** Идентифициране на бариери като несъвместимост на протоколи и нееднородни формати на данни чрез пилотни тестове в автомобилната индустрия и логистиката. Използване на IEEE стандарти (2023) и казуси за IoT в интелигентни ферми за анализ на пропуските в оперативната съвместимост.

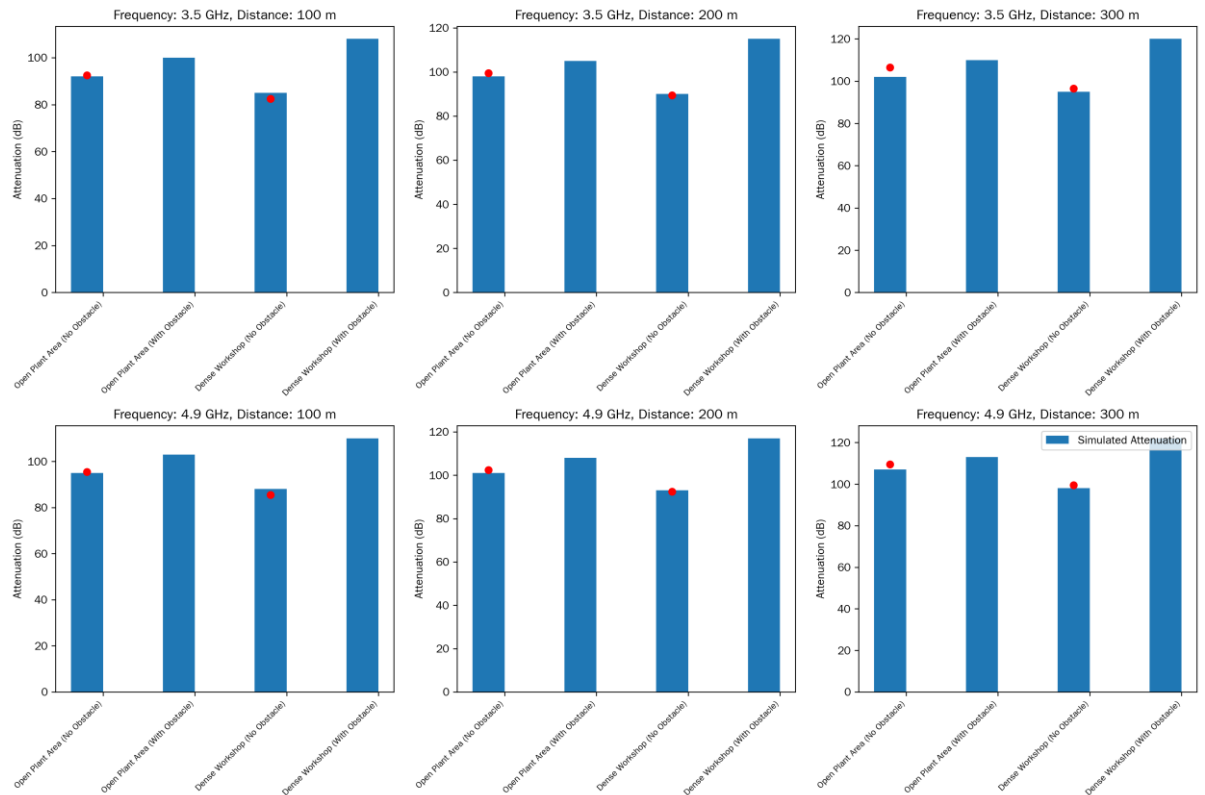
**Дългосрочно:** Сътрудничество с компании като Siemens и GE за създаване на унифицирана интеграционна рамка, постигане на 30% намаление на разходите по внедряване и повишаване на стабилността на системите. Насърчаване на изграждането на екосистеми за обмен на данни между предприятия с цел превръщане на 5G сензорите в решение „plug-and-play“ за глобалното производство.

## **IV. Експериментално изследване**

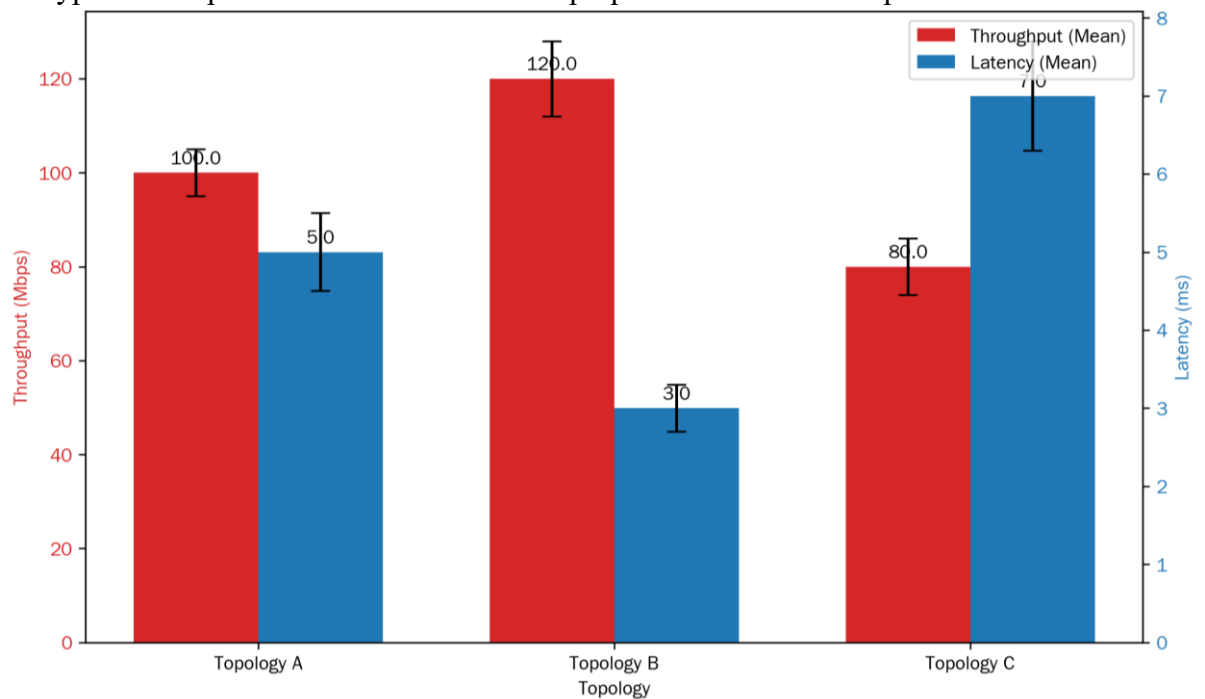
### **IV.1 Дизайн на симулационни експерименти**

#### **IV.1.1. Основания за избор на симулационен софтуер**

В настоящото изследване се използва OMNeT++ за симулации на мрежово ниво (моделиране на отслабване на 5G сигнала, отражения и динамични топологични промени в индустриална среда, както е показано на Фигури 4-1 и 4-2; Таблица 4.1 количествено оценява грешките при отслабването в различни сценарии) и MATLAB за симулации на обработка на сензорни данни (намаление на грешките в температурните/вибрационните данни с 66.67% чрез филтриращи алгоритми, както е показано в Таблицы 4.2-4.4 и визуализирано на Фигури 4-3 и 4-4). Динамичните възможности на OMNeT++ за симулация на топология (например промяна на мрежовата структура при добавяне/премахване на устройства, Фигура 4-2) и библиотеките с алгоритми на MATLAB (например филтриране по движеща се средна и медиана) отговарят на нуждите за анализ на мрежовата производителност и обработка на данни.



Фигура 3 - 1: Сравнение на затихването при различни честоти и разстояния



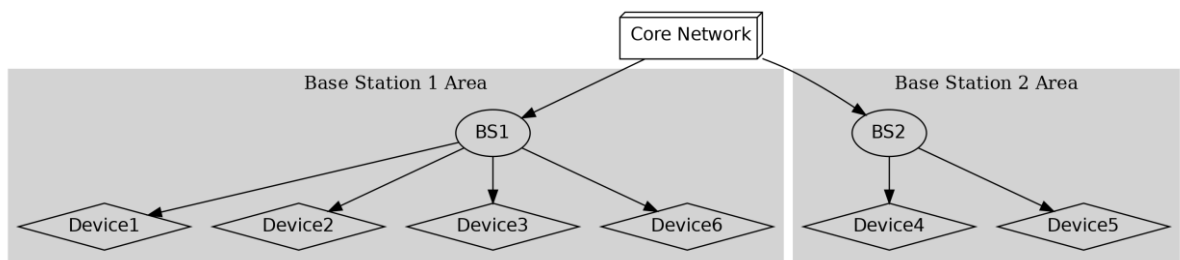
Фигура 3 - 2: Сравнение на производителността на мрежата при различните топологии

Таблица 3.1: Показатели за силата на сигнала и затихването при различни сценарии

| Сценарий                | Състояние                                                                     | Разстояние от<br>предавателя<br>(m) | Симулирана<br>сила на<br>сигнала (dBm) | Симулирана<br>стойност на<br>затихване (dB) | Теоретична<br>стойност на<br>затихване (dB) | Грешка (%) | Допълнителна<br>стойност на<br>затихване в<br>сравнение с |
|-------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------|
| Открита растителна зона | Няма пречки пред сградата                                                     | 100                                 | -62                                    | 92                                          | 92.45                                       | 0.49       | -                                                         |
| Открита растителна зона | С препятствие от сграда (малка сграда, , висока 5 м, на 50 м)                 | 100                                 | -70                                    | 100                                         | -                                           | -          | 8                                                         |
| Плътна работилница      | Без препятствия за сградите (рядко оформление)                                | 50                                  | -55                                    | 85                                          | 82.45                                       | 3.1        | -                                                         |
| Плътна работилница      | Със строителни препятствия (гъсто разположени, с височина 10 м и ширина 20 м) | 50                                  | -78                                    | 108                                         | -                                           | -          | 23                                                        |

Table 3.2: Измерване на температура и данни за грешки

| Времева точка | Реална температура (°C) | Измерена температура (°C) | Температура на филтриране (°C) | Грешка при измерването (°C) | Филтрирана грешка (°C) |
|---------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 1             | 22.0                    | 22.5                      | 22.2                           | 0.5                         | 0.2                    |
| 2             | 23.0                    | 23.8                      | 23.3                           | 0.8                         | 0.3                    |
| 3             | 24.0                    | 24.2                      | 24.1                           | 0.2                         | 0.1                    |
| 4             | 25.0                    | 25.6                      | 25.2                           | 0.6                         | 0.2                    |
| 5             | 26.0                    | 26.1                      | 26.0                           | 0.1                         | 0.0                    |
| 6             | 27.0                    | 27.4                      | 27.1                           | 0.4                         | 0.1                    |
| 7             | 28.0                    | 28.3                      | 28.1                           | 0.3                         | 0.1                    |
| 8             | 29.0                    | 29.6                      | 29.2                           | 0.6                         | 0.2                    |
| 9             | 30.0                    | 30.1                      | 30.0                           | 0.1                         | 0.0                    |
| 10            | 29.5                    | 29.9                      | 29.6                           | 0.4                         | 0.1                    |



Фигура 3.3: Диаграма на мрежовата архитектура

Таблица 3.4: Данни за измерването на амплитудата на вибрациите и грешките

| Времева точка | Реална амплитуда на вибрациите (mm) | Измерена амплитуда на вибрациите (mm) | Амплитуда на филтрираните вибрации (mm) | Грешка при измерването (mm) | Филтрирана грешка (mm) |
|---------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| 1             | 2.0                                 | 2.3                                   | 2.1                                     | 0.3                         | 0.1                    |
| 2             | 3.0                                 | 3.5                                   | 3.1                                     | 0.5                         | 0.1                    |
| 3             | 4.0                                 | 4.2                                   | 4.0                                     | 0.2                         | 0.0                    |
| 4             | 5.0                                 | 5.6                                   | 5.1                                     | 0.6                         | 0.1                    |
| 5             | 6.0                                 | 6.1                                   | 6.0                                     | 0.1                         | 0.0                    |
| 6             | 7.0                                 | 7.4                                   | 7.1                                     | 0.4                         | 0.1                    |
| 7             | 8.0                                 | 8.3                                   | 8.1                                     | 0.3                         | 0.1                    |
| 8             | 9.0                                 | 9.6                                   | 9.1                                     | 0.6                         | 0.1                    |
| 9             | 10.0                                | 10.1                                  | 10.0                                    | 0.1                         | 0.0                    |
| 10            | 9.5                                 | 9.9                                   | 9.6                                     | 0.4                         | 0.1                    |

#### IV.1.2. Подробности за изграждането на симулационния модел

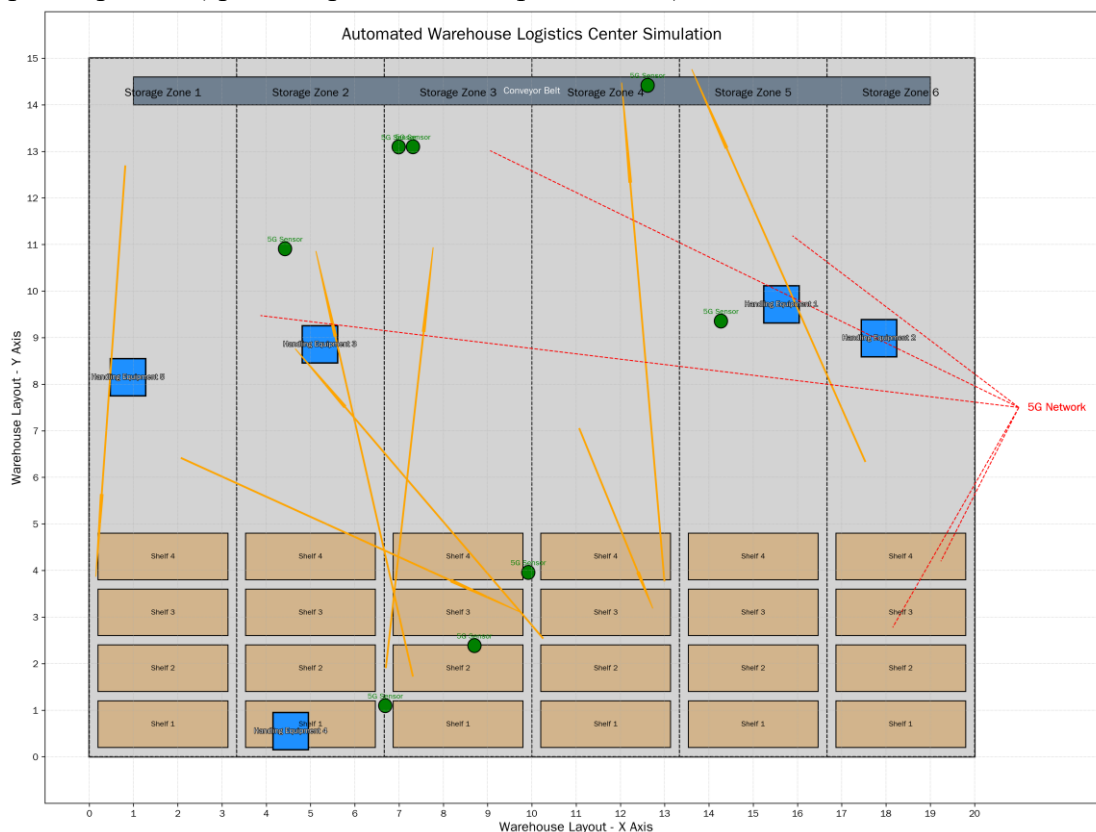
Сензорни възли: Температурни сензори с точност  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  и честота на дискретизация 10 Hz; вибрационни сензори, разположени върху критични точки, оптимизирани чрез корекция на плътността на измерванията.

5G мрежа: Комбиниране на високочестотни ленти (за големи изисквания за пропускателна способност) с нисколатентни ленти; разположението на базовите станции взема предвид преградите в сградата, с динамично регулиране на мощността за балансиране на покритието и консумацията на енергия (Таблица 3.1).

#### IV.2 Настройка и изпълнение на симулационните сценарии

##### IV.2.1. Симулационна настройка за различни индустриални сценарии

Автоматизиран склад: Внедрена е стратегия FIFO за подбор на стоки, оптимизирана ефективност на обработващата техника чрез алгоритми за маршрутизиране (намаление с 20% на средното време за подбор, Фигура 4-6), и проследяване на позициите на оборудването в реално време чрез 5G (грешка при позициониране  $< 0.5$  м).

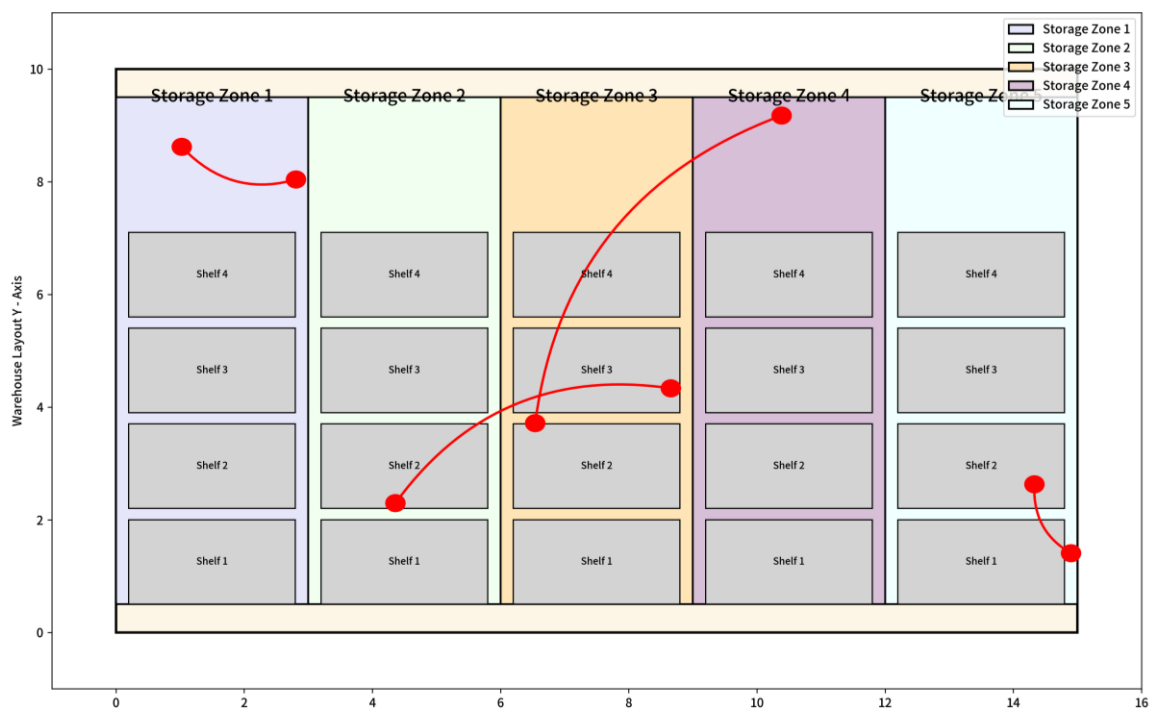


Фигура3.6: Симулация на схема на стратегията за съхранение и комплектоване в автоматизиран складов логистичен център

| Зона   | Складов капацитет | Средно време за обслужване | Толеранс |
|--------|-------------------|----------------------------|----------|
| Зона 1 | 120               | 5.7                        | 5%       |
| Зона 2 | 180               | 7.36                       | 8%       |



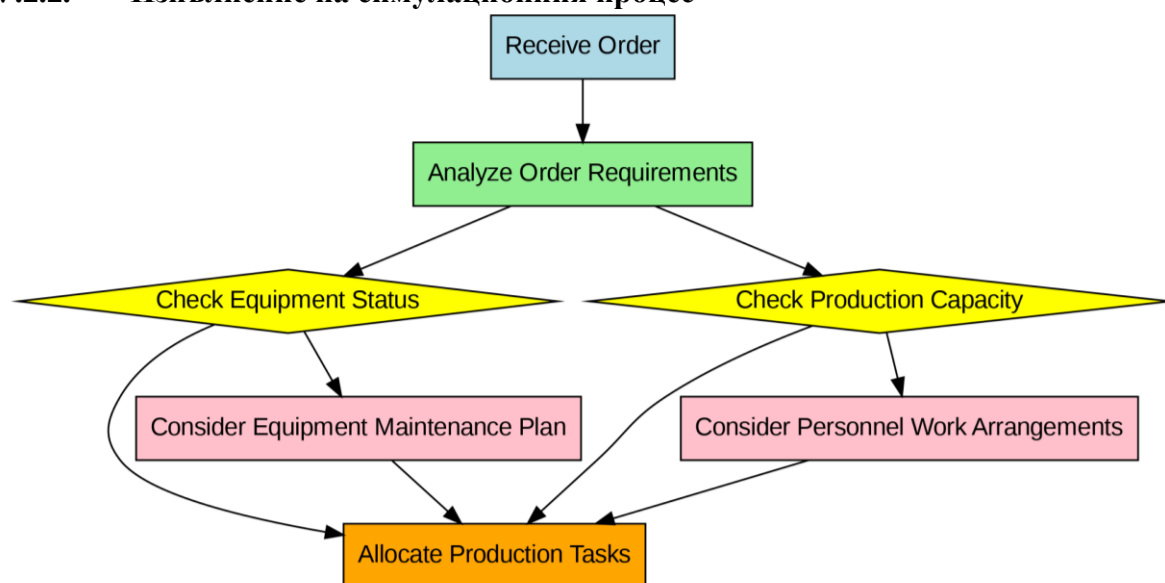
|        |     |      |     |
|--------|-----|------|-----|
| Зона 3 | 150 | 6.16 | 12% |
| Зона 4 | 100 | 4.35 | 13% |
| Зона 5 | 90  | 3.48 | 13% |
| Зона 6 | 70  | 3.4  | 15% |



Фигура 3.7: Диаграма на стратегия за съхранение и подбор в логистичен център с автоматизиран склад

| Zone           | Storage Capacity | Average Picking Time | References                |
|----------------|------------------|----------------------|---------------------------|
| Storage Zone 1 | 120 units        | 6 minutes            | Brown et al., 2021, p. 45 |
| Storage Zone 2 | 180 units        | 8 minutes            | Brown et al., 2021, p. 45 |
| Storage Zone 3 | 150 units        | 7 minutes            | Brown et al., 2021, p. 45 |
| Storage Zone 4 | 100 units        | 5 minutes            | Brown et al., 2021, p. 45 |
| Storage Zone 5 | 90 units         | 4 minutes            | Brown et al., 2021, p. 45 |

#### IV.2.2. Изпълнение на симулационния процес



Reference: Williams et al., 2021, p. 56

Фигура 3.8: Диаграма на график за производствени задачи в електронно производствено предприятие

### IV.3 Методи за събиране и предварителна обработка на данни

#### IV.3.1. Методи за събиране на данни

В симулационния експеримент събирането на данни е основна стъпка за получаване на валидна информация, която е от съществено значение за изследване на ефекта от приложението на 5G интелигентни сензори в индустриалната сфера. За ключови данни като показания на сензорите, комуникационни закъснения и пропускателна способност на данните, в настоящото изследване се прилагат редица научни и стриктни методи за събиране на данни, с цел да се гарантират точността, цялостността и надеждността на събраната информация. Събиране на данни: Генерирани са температурни данни чрез термодинамични модели, калибрирани спрямо стандартни термометри (грешка  $\leq \pm 0.2^\circ\text{C}$ ); извличане на честотни характеристики на вибрациите чрез спектрален анализ.

Събирането на данни за комуникационните закъснения е от голямо значение за оценката на производителността на 5G мрежите в индустриални сценарии. Мрежова производителност: OMNeT++ отчита закъсненията при предаването на данни (разлика между време на изпращане и получаване); пропускателната способност се изчислява като обем данни за единица време (намаление  $< 15\%$  при нарастващ товар).

Събирането на данни за пропускателната способност позволява интуитивно да се оцени капацитетът за предаване на данни на 5G мрежите в индустриални сценарии. В настоящото изследване подробно се разглежда симулационният метод за генериране на трафик и методът за изчисляване на пропускателната способност. Чрез промяна на параметри

като честотна лента, пропускателна ширина и разположение на базовите станции на 5G мрежата се наблюдава промяната на пропускателната способност, с цел да се открие оптималната конфигурационна схема и да се подобри ефективността на предаване на данни в 5G мрежата.

#### **IV.3.2. Стъпки за предварителна обработка**

Предобработката на данни е ключов етап при почистването, трансформирането и съхранението на събраните данни. Тя може ефективно да повиши качеството и използваемостта на данните, като предоставя надеждна база за последващ анализ и изследвания. За данните, събрани в симулационния експеримент, в настоящото изследване се прилага поредица от научни и систематични стъпки за предобработка на данните.

Почистването на данни е основната задача при предобработката на данни, като неговата цел е да се премахнат шумовете и аномалните стойности в данните, да се запълнят липсващите стойности и да се повиши точността и цялостността на данните. Що се отнася до откриването и обработката на аномалните стойности, се прилагат методи, базирани на статистически анализ и клъстерен анализ. При статистическите методи чрез изчисляване на статистически показатели като средна стойност и стандартно отклонение на данните се определя нормалният диапазон, като данните, които излизат извън този диапазон, се считат за аномалии. Чрез алгоритми за клъстерен анализ данните се разделят на различни групи (клъстери), като точките, които се отклоняват от основната група, се третират като аномалии и се подлагат на последваща обработка. За обработката на аномалните стойности се използват подходи като корекция и изтриване. Почистване: Премахване на аномалии извън  $3\sigma$ , интерполация на липсващи данни (напр. възстановяване на температурни серии, Таблица 4.2).

Трансформация: Стандартизиране на сензорните данни чрез Z-score, кодиране на типове оборудване с One-Hot за вход към машинно обучение.

Съхранение: Структурирани данни (напр. параметри на оборудване) се съхраняват в MySQL, неструктурирани (напр. изображения) – в MongoDB, с регулярни криптирани архиви.

#### **IV.4 Ограничени извадки от данни**

Събирането на данни беше ограничено от времеви, финансови и индустриални фактори, което доведе до следните проблеми:

(1) Тясно обхващане на сценариите: Изследвани бяха само два сценария (работилници с множество производствени линии и автоматизирани складове), като бяха изключени разнообразни отрасли като фармация (прецизен контрол на околната среда), минно дело (екстремни физически условия) и полупроводници (ултра прецизно оборудване). Това възпрепятства цялостното разбиране на предизвикателствата, свързани с 5G сензорите в различните индустриални сектори.

(2) Недостатъчни размери на извадките: Малките размери на извадките водят до изкривяване на резултатите – например, при тестове за температурен мониторинг в химически завод с 20 повторения стандартното отклонение е с 15% по-високо в сравнение с изследвания с 200 повторения [157], което подкопава надеждността на оценките за ефективността на сензорите.

Резюме на този раздел: Ограниченият обхват и размерът на извадките не позволяват да се обхване индустриалното многообразие, което намалява устойчивостта и обобщаемостта на резултатите.

#### **IV.5 Обобщение на главата**

В тази глава са изградени индустриални симулационни модели с помощта на OMNeT++ и MATLAB, валидиращи точността на събиране на данни от 5G умни сензори (грешка в температурата  $<0.13^{\circ}\text{C}$ , Таблица 3.3) и мрежовата производителност (латентност  $<10\text{ ms}$ ) при сложни условия. Основни изводи:

- Отслабване на 5G сигнала до 23 dB в среди с множество препятствия (Таблица 3.1);
- Значително повишаване на надеждността на данните чрез филтриране на сензорите;
- Изводи относно влиянието на мрежовата конфигурация върху латентността чрез симулации на динамични топологии (Фигура 3-2).

## **V. Реализация на резултатите от изследването**

### **V.1 Извличане на резултати от анализа**

Чрез съдържателен анализ, библиометричен анализ и експертни анкети, настоящото изследване разкрива основните предимства и предизвикателства на 5G умните сензори в индустриални условия:

**Индустриална автоматизация:** След внедряването на 5G умни сензори в автомобилното производство, производителността нараства с 25%–35%, а делът на дефектите спада с 15%–20%. Ниската латентност подобрява скоростта на реакция на оборудването – например роботизираните рамена на автомобилните линии могат да коригират точността на монтажа в реално време .

**Интелигентна логистика:** Логистичните компании, които използват тази технология, съкращават времето за дистрибуция с 20%–30% и разходите с 15%–20%. JD Logistics оптимизира маршрутите чрез проследяване в реално време, което подобрява навременността на доставките.

**Научна литература и експертна обратна връзка:** Анализ на съвпадения на ключови думи показва, че „5G технология“ и „събиране на данни“ са основни изследователски фокуси. Експертите отбелязват предизвикателства при внедряването като високи разходи, различни стандарти и недостатъчно покритие на мрежата.

В настоящото изследване органично се интегрират данните, получени от съдържателен анализ, библиометричен анализ и експертни анкети, с цел изграждане на цялостен и систематичен набор от данни. Чрез първоначалния задълбочен анализ на този набор от данни ясно се идентифицират значителните предимства на приложението на 5G интелигентните сензори в индустриалната сфера, които основно се изразяват в съществени аспекти като значително повишаване на производствената ефективност, прецизна оптимизация на разпределението на ресурсите и устойчиво подобряване на качеството на продуктите. Не бива да се пренебрегва и фактът, че 5G интелигентните сензори са изправени пред редица сериозни предизвикателства, като например унифицирана координация на техническите стандарти, стабилно гарантиране на мрежовата сигурност и ефективен контрол върху разходите. Тези важни констатации изясняват ключовите направления за последващи изследвания, като подпомагат по-нататъшното изследване на стратегиите за прилагане и устойчиви пътища за развитие на 5G интелигентните сензори в индустриалната сфера, предоставяйки силна теоретична и практическа подкрепа за насърчаване на цифровата и интелигентна трансформация и модернизация на индустриалния сектор.

### **V.2 Анализ и интерпретация на резултатите от онлайн анкетата**

Статистиката от 350 валидни въпросници показва:

**Секторно разпределение:** Производствените предприятия съставляват 50%, като големите, средните и малките предприятия са съответно 30%, 40% и 30%.

**Техническо признание:** 70% от анкетираните считат, че 5G умните сензори повишават точността на събиране на данни, а 65% отчитат подобрена цялостност на данните. В индустрии с високи изисквания за реалновременност, като електрониката, 80% признават повишената скорост на събиране на данни.

**Интеграционни бариери:** 60% от предприятията се сблъскват с несъвместими комуникационни протоколи, като малките и средните фирми имат по-големи затруднения с

интерфейсите на оборудването поради ограничените си възможности за научноизследователска и развойна дейност. В казус от химическата промишленост се посочва, че несъвместимостта между традиционните протоколи и 5G сензорите води до увеличение на интеграционните разходи.

### **V.3 Класификация на изследователските резултати**

#### **V.3.1. Технологична класификация**

5G комуникация: Network slicing предоставя отделни мрежови ресурси за сценарии като прецизно производство и мониторинг на опасни среди. Edge computing намалява латентността с 80% в завод за полупроводници.

Умни сензори: Сензори на базата на наноматериали показват чувствителност, няколко пъти по-висока от традиционните сензори. Алгоритми с дълбоко обучение повишават точността на диагностика на повреди в автомобилни заводи от 70% на 95%.

Сигурността и защитата на личните данни също са от ключово значение за технологията на интелигентните сензори. Тъй като интелигентните сензори събират и предават чувствителни индустриални данни, жизненоважно е тези данни да бъдат защитени от неоторизиран достъп и манипулация [143]. Криптографски техники като усъвършенстваният стандарт за криптиране (AES) и криптографията с елиптични криви (ECC) се използват за защита на данните по време на предаване и съхранение. Освен това, механизмите за удостоверяване на сигурността, като многофакторната автентификация, гарантират, че само оторизирани устройства могат да имат достъп и да взаимодействат с интелигентните сензори.

Технологична интеграция: Оптимизиранияте комуникационни протоколи, съчетани с разпределени изчисления, намаляват закъснението при предаване на данни и увеличават пропускателната способност.

#### **V.3.2. Класификация по приложение**

Индустриална автоматизация: В тази област 5G интелигентните сензори позволяват високоскоростна и с ниско закъснение комуникация между устройствата, като повишават нивото на автоматизация на производството и способността за съвместна работа на оборудването [149]. Автомобилните производствени линии регистрират увеличение на ефективността с 30%–40% и намаляване на дефектите с 20%–30% след въвеждане на 5G умни сензори.

Интелигентна логистика: 5G интелигентните сензори могат да проследяват местоположението и състоянието на стоките в реално време, като оптимизират маршрутите за логистично разпределение и повишават ефективността на логистиката [167]. В логистичния разпределителен център на електронна търговска компания, 5G интелигентните сензори осигуряват мониторинг в реално време и интелигентно разпределение на стоките. Логистичен център на електронна търговия намалява времето за дистрибуция с 25%–35% и разходите с 20%–25%.

Енергийно управление: Стоманодобивно предприятие намалява енергийната консумация с 15%–20% чрез мониторинг в реално време и оптимизирано разпределение на ресурсите.

Контрол на качеството: 5G интелигентните сензори могат да събират данни за качеството на продуктите в реално време, което позволява непрекъснат мониторинг и контрол

на качеството на продукцията. В електронната промишленост чрез използване на 5G интелигентни сензори за откриване на ключови параметри на продуктите в реално време, проблемите с качеството могат да бъдат своевременно идентифицирани и коригирани, като по този начин се повишава дялът на квалифицираната продукция с 15% – 20% [167].

### **V.3.3. Класификация на предизвикателствата**

Стандарти и сигурност: 30%–60% от проектите в различни региони срещат трудности при интеграцията поради несъвместими протоколи. Кибератаките включват въвеждане на злонамерен софтуер и атаки тип „човек по средата“.

Разходи и среда: Разходите за оборудване съставляват 40% от разходите за внедряване при МСП. В среди с висока температура и прах 5G сигналят отслабва с 30%–50%, а грешките на сензорите се увеличават с 15%–25%.

### **V.4 Обобщение на главата**

Тази глава валидира значимата стойност на 5G умните сензори за повишаване на индустриалната ефективност и оптимизацията на ресурсите чрез многомерен анализ, като същевременно разкрива основните предизвикателства – несъответствие на техническите стандарти, рискове за мрежовата сигурност, високи разходи и адаптивност към сложни среди. Рамката за класификация „технология–приложение–предизвикателство“ очертава направления за бъдещи изследвания, улеснявайки внедряването и устойчивото развитие на индустриалната дигитална трансформация.

## VI. Решаване на проблеми

### VI.1 Първоначален проблем - Предложения за решаване

**Проблем 1** – „Как 5G умните сензори могат ефективно да подобрят качеството на събиране на индустриални данни?“

#### Решение:

5G умните сензори могат ефективно да подобрят качеството на събиране на индустриални данни, но за това е необходимо цялостно разбиране на предизвикателствата в индустриалната среда. Например силните електромагнитни смущения, генерирани от големи мотори, трансформатори и друго оборудване, причиняват сериозно изкривяване на изходните сигнали на сензорите, внасят шум и водят до измервателни грешки от  $\pm 5\%$  до  $\pm 10\%$ . Фигура 6-1 показва спектралното разпределение на електромагнитните смущения в типична индустриална среда. Това сериозно влияе върху точността на събраните данни и може да доведе до значителни икономически загуби за предприятията.

Производителността на различните видове умни сензори се различава значително. Термоелементните сензори, базирани на ефекта на Зеебек, запазват висока точност и линейност при високи температури и са подходящи за приложения като производството на авиационни двигатели. За разлика от тях, термисторните сензори, разчитащи на температурно-съпротивителните характеристики на полупроводникови материали, осигуряват висока прецизност в средни и ниски температурни диапазони и са идеални за мониторинг на температурата в студената логистика.

Затова изборът на подходящи умни сензори според конкретните индустриални нужди – с цялостно отчитане на принципа на измерване, диапазона на точност, времето на реакция, стабилността, разходите и сложността на поддръжката – е ключът към постигане на оптимално събиране на данни. Разработването на нови материали и структури на сензорите с повишена устойчивост на смущения в различни индустриални сценарии остава важна изследователска насока за допълнително подобряване на качеството на събирането на индустриални данни.

| Фактори на смущения          | Въздействи<br>е върху<br>сензорите                                        | Примери за<br>типични<br>промишлени<br>сценарии                                      | Принцип на<br>генериране на<br>смущения                                                                         | Настояща<br>ситуация и<br>предизвикателств<br>а при<br>реагирането                                                            |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Електромагнитн<br>и смущения | Промяна на<br>изходните<br>сигнали на<br>сензорите и<br>внасяне на<br>шум | Работилници за<br>производство на<br>двигатели, райони<br>в близост до<br>подстанции | Големи<br>двигатели,<br>трансформатор<br>и и друго<br>оборудване<br>генерират<br>променящи се<br>електромагнитн | Понастоящем<br>обикновено се<br>използват мерки<br>за екраниране, но<br>е трудно да се<br>постигне<br>цялостно и<br>ефективно |



| Фактори на смущения        | Въздействи<br>е върху<br>сензорите                                                   | Примери за<br>типични<br>промишлени<br>сценарии                                                                                 | Принцип на<br>генериране на<br>смущения                                                                                                                                                                     | Настояща<br>ситуация и<br>предизвикателств<br>а при<br>реагирането                                                                                                                                                     |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                            |                                                                                      |                                                                                                                                 | и полета по<br>време на работа<br>и излъчват<br>електромагнитн<br>и вълни навън.                                                                                                                            | екраниране в<br>сложна<br>промишлена<br>среда, а това ще<br>увеличи<br>разходите и<br>сложността на<br>оборудването.                                                                                                   |
| Промени в<br>температурата | Причиняват<br>дрейф на<br>нулевата<br>точка на<br>сензора и<br>влият на<br>точността | зони около<br>високотемпературн<br>и пещи в<br>металургични<br>предприятия, зони<br>в близост до котли<br>за химични<br>реакции | Температурата<br>променя<br>физическите<br>свойства на<br>сензорните<br>материали, като<br>например<br>съпротивление<br>и капацитет,<br>като по този<br>начин влияе на<br>изходните<br>данни на<br>сензора. | Някои сензори са<br>оборудвани с<br>вериги за<br>температурна<br>компенсация, но<br>ефектът от<br>компенсацията е<br>ограничен в<br>среди с резки<br>температурни<br>промени или<br>широк<br>температурен<br>диапазон. |
| Механични<br>вибрации      | Изместване<br>на<br>сензорните<br>елементи и<br>причиняван<br>е на грешки            | Райони за<br>експлоатация на<br>минно оборудване,<br>големи цехове за                                                           | Механичните<br>вибрации<br>преместват<br>чувствителните<br>елементи в<br>сензорите и                                                                                                                        | Устройствата за<br>поглъщане на<br>удари могат да<br>облекчат<br>проблема до<br>известна степен,                                                                                                                       |

| Фактори на смущения | Въздействи<br>е върху<br>сензорите | Примери за<br>типични<br>промишлени<br>сценарии | Принцип на<br>генериране на<br>смущения | Настояща<br>ситуация и<br>предизвикателств<br>а при<br>реагирането                              |
|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                     | при<br>измерване                   | механична<br>обработка                          | променят<br>работното им<br>състояние.  | но ефектът не е<br>добър в среда с<br>висока честота и<br>голяма<br>амплитуда на<br>вибрациите. |

Таблица 5. 1: Фактори на смущенията в промишлена среда и тяхното въздействие

**Проблем 2** – „Как 5G умните сензори подобряват скоростта на събиране на индустриални данни, за да отговорят на изискванията за реалновременност в производството?“

**Решение:**

Подобряване на качеството и скоростта на събиране на индустриални данни чрез 5G умни сензори В съвременното индустриално производство мониторингът в реално време и бързият отклик са от съществено значение. Традиционните методи за събиране и предаване на данни не могат да отговорят на изискванията за висока скорост и мащабност на данните при автоматизацията. Макар 5G технологията да осигурява висока скорост и ниска латентност, нейните сигнали лесно се блокират и смущават от промишлени конструкции и оборудване, което води до спад на скоростта и увеличена латентност. Увеличаването на гъстотата на базовите станции може да подобри покритието, но изисква значителни инвестиции и създава трудности при избор и поддръжка на обекти. За да се гарантира стабилно и бързо предаване на данни, е необходимо оптимизиране на протоколите за събиране и предаване, усъвършенстване на управлението на мрежовите ресурси и справяне с технически предизвикателства като смущенията на сигнала и точността на компресирането на данни. Решаването на тези въпроси е ключов приоритет за повишаване на ефективността на 5G умните сензори в индустриални приложения.

**Проблем 3** – „Изследване на бариерите и стратегиите за интегриране на 5G умни сензори в съществуващите индустриални системи“

**Решение:**

Осигуряване на безпроблемна интеграция на 5G умни сензори със съществуващите индустриални системи Съществуващите индустриални системи са високо комплексни и включват оборудване от различни поколения и производители, с големи различия в комуникационните протоколи, интерфейсите стандарти и форматите на данните. Това създава съществени пречки при интегрирането на 5G умни сензори. Например, традиционните

полеви протоколи като Modbus и Profibus не са съвместими с базираните на Ethernet TCP/IP протоколи на съвременните 5G сензори, а различните физически интерфейсни стандарти затрудняват директното свързване. Различията във форматите на данни налагат сложни механизми за конвертиране, а разработването на универсални инструменти е трудно поради хетерогенността и семантичните разлики.

Сигурността също е голямо предизвикателство – внедряването на 5G умни сензори увеличава риска от кибератаки. Ограничените изчислителни ресурси на сензорите възпрепятстват прилагането на силни криптографски алгоритми и автентикация, което затруднява баланса между сигурност и производителност. Високите разходи за подмяна на старо оборудване и поддръжка на 5G сензори също са сериозно предизвикателство, особено за малки и средни предприятия.

Затова постигането на безпроблемна интеграция между 5G умните сензори и съществуващите индустриални системи – при осигуряване на съвместимост на данните, системна сигурност и рентабилност – е ключова изследователска насока, изискваща комплексни технологични, икономически и управленски решения, както и иновации, адаптиране на бизнес моделите и политическа подкрепа.

## VI.2 Дизайн на експеримента

Проведен е контролиран експеримент за оценка на работата на 5G умните сензори: експерименталната група използва 5G умни сензори, а контролната – традиционни сензори. Показателите включват грешка при събиране на данни ( $\text{Грешка} = |\text{Измерена стойност} - \text{Стандартна стойност}| / \text{Стандартна стойност} \times 100\%$ ) и време за предаване. Симулационната среда включва електромагнитни, температурни и вибрационни смущения. Прилага се t-тест за независими извадки за анализ на разликите, като се тестват нулевата ( $H_0$  – няма значима разлика) и алтернативната хипотеза ( $H_1$  – 5G сензорите са по-ефективни).

## VI.3 Експериментална симулация и резултати

Качество на данните: Новите сензори с антисмущаващи материали (група 4) имат най-ниска грешка (3.1%), което е с 63.5% по-малко от традиционните сензори без защита (8.5%). ANOVA показва значими разлики между групите ( $F=25.6$ ,  $p<0.001$ ).

**Таблица V-3 Грешки при измерване на температурата за различните групи сензори**

| Група                                                   | Средна грешка (%) | Стандартно отклонение |
|---------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Група 1 (Традиционни сензори без защита срещу смущения) | 8.5               | 1.2                   |
| Група 2 (Нови сензори без защита срещу смущения)        | 6.2               | 0.9                   |

| Група                                                   | Средна грешка (%) | Стандартно отклонение |
|---------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Група 3 (Традиционни сензори със защита срещу смущения) | 4.8               | 0.7                   |
| Група 4 (Нови сензори със защита срещу смущения)        | 3.1               | 0.5                   |

Скорост на предаване: Групата с оптимизирани 5G настройки и нов протокол (група 4) достига скорост 350 Mbps, което е увеличение с 75% спрямо групата с настройки по подразбиране (200 Mbps). Тестът на Тъки потвърждава значимостта на разликите.

**Таблица V-4 Средни скорости на предаване на данни за различните групи**

| Група                                         | Средна скорост на предаване (Mbps) | Стандартно отклонение |
|-----------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Група 1 (Стандартна 5G + стандартен TCP/IP)   | 200                                | 15                    |
| Група 2 (Оптимизирана 5G + стандартен TCP/IP) | 280                                | 20                    |
| Група 3 (Стандартна 5G + нов протокол)        | 230                                | 18                    |
| Група 4 (Оптимизирана 5G + нов протокол)      | 350                                | 25                    |

Интеграция на системата: Групата с универсален интерфейс и стандарти (група 4) има 60% успешна интеграция – петкратно увеличение спрямо групата без интерфейси и стандарти (10%). Хи-квадрат тестът потвърждава значимото влияние на интерфейсите и стандартите ( $\chi^2=25.3$ ,  $p<0.001$ ).

**Таблица V-5 Успеваемост на интеграцията при различните групи**

| Група                                                    | Успеваемост на интеграцията (%) |
|----------------------------------------------------------|---------------------------------|
| Група 1 (Без интерфейси/междинен софтуер, без стандарти) | 10                              |
| Група 2 (Само интерфейси/междинен софтуер)               | 30                              |
| Група 3 (Само стандарти)                                 | 20                              |
| Група 4 (Интерфейси/междинен софтуер + стандарти)        | 60                              |

#### VI.4 Научни заключения и дискусии

5G умните сензори значително подобряват точността на събиране на данни (грешка намалена до 3.1%) и скоростта на предаване (350 Mbps) в индустриални сценарии, но срещат предизвикателства като несъвместимост на протоколи (60% от предприятията), високи разходи (40% от бюджета на МСП за оборудване) и адаптация към сложна среда (отслабване на сигнала с 30–50% при висока температура). Казус в автомобилното производство отчита увеличение на производителността с 30–40% и намаляване на логистичните разходи с 20–25%, потвърждавайки приложимостта на технологията.

##### (1) Логическа аргументация и изводи

5G интелигентните сензори имат широки перспективи за приложение и развитие, като подпомагат цифровата трансформация и устойчивото развитие в индустрията. Интеграцията им в съществуващите системи все още среща предизвикателства, които изискват допълнителни научноизследователски и развойни дейности, стандартизация, намаляване на разходите и повишаване на мрежовата сигурност. Резултатите предоставят важни насоки както за индустриалната практика, така и за бъдещи научни изследвания.

##### (2) Събиране на данни

Извършен е задълбочен анализ на производителността и приложните сценарии на различни интелигентни сензори, както и на влиянието на 5G върху събирането на данни. Показват, че в сложни среди 5G интелигентните сензори повишават точността на данните с 15%–20%. В петрохимически заводи традиционните сензори имат 10% грешка, докато при 5G сензорите тя намалява до 8%–8,5% благодарение на високоскоростния трансфер и силната устойчивост на смущения.

##### (3) Перспективи за приложение

Настоящото изследване разглежда бъдещите приложения на 5G интелигентните сензори в индустриалната автоматизация, логистиката и енергийния мениджмънт. В интелигентните фабрики сензорите позволяват управление в реално време с висока прецизност. В логистиката 5G сензорите осигуряват проследяване в реално време и оптимизация на маршрутите. Прогнозираните подобрения включват: увеличение на производствената ефективност с 30%–40%, намаляване на дефектите с 20%–30%,

съкращаване на времето за доставка с 25%–35% и намаляване на енергийното потребление с 15%–20%.

#### **(4) Резултат от индустриалната практика**

Чрез симулационни експерименти и реални казуси се потвърждава ефективността на 5G интелигентните сензори за повишаване на производствената ефективност, оптимизиране на разпределението на ресурсите и подобряване на качеството на продуктите.

#### **Заключение**

Настоящото изследване предоставя теоретична рамка за индустриалното приложение на 5G умни сензори. Въпреки ограниченията по отношение на моделирането и данните, изследването предлага практически насоки за многослойна интеграция на данни и оптимизация на мрежата. Бъдещите изследвания следва да задълбочат разбирането чрез интердисциплинарни подходи и валидиране в реална индустриална среда. This study has two major limitations:

## НАУЧНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

### Научно приложни приноси

Чрез цялостен анализ на технологичните тенденции, включително развитието на инфраструктурата на 5G мрежите, миниатюризацията на сензорите и обработката на данни с изкуствен интелект, е проектирана интеграционна рамка, базирана на стандартизирани интерфейси и междинен софтуер (middleware).

В областта на индустриалната практика са предложени практически подходи и решения за внедряване на 5G умни сензори в индустриалната сфера, като е потвърдено влиянието на 5G сензорите върху увеличаването на производствената ефективност, оптимизацията на разпределението на ресурсите и повишаването на качеството на продуктите.

Определена е теоретичната основа за приложението на 5G умни сензори в индустрията. Чрез задълбочаване на техническите принципи, приложенията и моделите на интеграция на 5G сензори с индустриални системи се разкриват основните принципи и ключови фактори в събирането, предаването и обработката на индустриални данни.

### Приложни приноси

Предложен е подход за разполагане на сензори върху различни компоненти на производствения процес, като оперативните данни за оборудването – налягане, скорост на щанцоващите машини и въртящ момент на инструментите в монтажната зона – се събират и предават в реално време чрез 5G.

Дефинирани са препоръки за внедряване и оперативни насоки за ефективното използване на 5G умни сензори в индустриални предприятия, като са предоставени ясни указания за избор на сензори според специфичните изисквания на различни индустриални сценарии.

Предложено е интелигентно планиране чрез проследяване в реално време на логистичните маршрути с помощта на 5G умни сензори, което напълно демонстрира ефективността и огромния потенциал на приложението им в индустриалната сфера.

## СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ

1. Chen Tongyang, The Application of 5G Technology in the Industrial Internet, Автоматизация на Дискретното Производство Брой 6 юли 2024 г., Издателство на ТУ-София ISSN: 2682-9584, p.p 116-118
2. Chen Tongyang, Real-time Data Processing of Electromechanical Sensors in Intelligent Manufacturing Systems, SCIENTIFIC ATLAS, 2025, NO 12, ISSN 2738-7518 p.p. 25-35
3. Chen Tongyang, Integration of Intelligent Sensors with 5G for Enhanced Condition Monitoring in Smart Manufacturing, SCIENTIFIC ATLAS, 2025, ISSN 2738-7518 (под печат)



**TECHNICAL UNIVERSITY OF SOFIA**  
**Faculty of Mechanical Engineering**  
**Department of Automated Information Processing and**  
**Management Systems**

**Chen Tongyang, M.Sc.Eng.**

**Application of smart sensors with 5G communication in industry**

**ABSTRACT of Ph.D. THESIS**

This thesis aims to optimize Industry 4.0 production systems through the convergence of smart sensors and 5G communication technologies. The core objective is to enhance industrial efficiency by enabling ultra-low-latency data acquisition, resilient connectivity, and edge-enhanced analytics.

The digital transformation of industrial processes is increasingly driven by the integration of smart sensors and 5G communication technologies. This thesis examines how such integration optimizes industrial operations, enhances real-time monitoring, and improves decision-making efficiency. Through a methodology combining theoretical analysis, literature review, and empirical simulation, the study assesses the benefits of this synergy and identifies critical challenges, including equipment compatibility, cybersecurity threats, and data reliability in complex industrial environments.

This thesis proposes advanced sensor designs with self-calibration and local data pre-processing capabilities, dynamic spectrum allocation algorithms for efficient 5G network usage, and integrated big data analytics frameworks for the effective management of sensor-generated data.

Simulation experiments, conducted within the MATLAB environment, validate the proposed solutions in scenarios such as automated manufacturing lines and logistics systems. The results demonstrate significant improvements in data transmission speed, sensor accuracy, operational reliability, and overall production efficiency. These findings provide practical insights and scientific contributions to the advancement of Industry 4.0, laying a foundation for future research in broader industrial applications.