



ПЛОВДИВСКИ УНИВЕРСИТЕТ „ПАИСИЙ ХИЛЕНДАРСКИ“  
ФАКУЛТЕТ ПО МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА  
КАТЕДРА „КОМПЮТЪРНИ СИСТЕМИ“

**ЕВГЕНИ ВЛАДИМИРОВ ВЪЛЧЕВ**

**ЮТ СРЕДА ЗА ИНТЕЛИГЕНТНО ЖИВОТНОВЪДСТВО**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на

**ДИСЕРТАЦИОНЕН ТРУД**

ЗА ПРИСЪЖДАНЕ НА ОБРАЗОВАТЕЛНАТА И НАУЧНА СТЕПЕН „ДОКТОР“

Област на висше образование 4. Природни науки, математика и  
информатика

Професионално направление 4.6. Информатика и компютърни науки  
Докторска програма „Информатика“ към катедра „Компютърни системи“

**Научни ръководители:**

проф. д-р Станимир Стоянов

проф. д-р Тодорка Глушкова

Пловдив 2025 г.

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от катедрения съвет на катедра „Компютърна информатика“ на Факултета по математика и информатика при Пловдивския университет „Паисий Хилендарски“ на 14.02.2025 г.

Дисертационният труд съдържа 133 страници. Библиографията включва 111 източника. Броят на авторските публикации по темата на дисертационния труд е 2.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 09.05.2025 г. от ..... ч. в Заседателна зала, Нова сграда на Пловдивския университет, бул. „България“ № 236.

Материалите по защитата са на разположение на интересувалите се в Деканата на ФМИ – каб. 330 в Нова сграда на ПУ „Паисий Хилендарски“, всеки работен ден от 8:30 до 17:00 часа.

Автор: Евгени Владимиров Вълчев

Заглавие: IoT СРЕДА ЗА ИНТЕЛИГЕНТНО ЖИВОТНОВЪДСТВО

Пловдив, 2025 г.

# СЪДЪРЖАНИЕ

|                                                                                                           |                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| УВОД .....                                                                                                | 4                            |
| 1. Основна цел и задачи на дисертационното изследване .....                                               | ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED. |
| Основна цел: .....                                                                                        | 4                            |
| Основни задачи на дисертационното изследване: .....                                                       | 4                            |
| <b>ГЛАВА 1. МОТИВАЦИЯ И СЪСТОЯНИЕ НА ИЗСЛЕДВАНИЯ ПРОБЛЕМ .....</b>                                        | <b>5</b>                     |
| 1. Мотивация за провеждане на дисертационното изследване.....                                             | 5                            |
| 2. CPS и CPSS платформи.....                                                                              | 6                            |
| 3. Изводи от Първа глава.....                                                                             | 8                            |
| <b>ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА НА ИОТ ПЛАТФОРМА ЗА ИНТЕЛИГЕНТНО ЖИВОТНОВЪДСТВО .....</b>                          | <b>8</b>                     |
| 1. Базова постановка и подходи за изграждане на системата за интелигентно животновъдство .....            | 8                            |
| 2. Детайлен преглед на архитектурата на ИОТ система за интелигентно животновъдство.....                   | 10                           |
| 3. Взаимовръзки и описание на компонентите и слоевете, комуникация, протоколи, начин на свързване .....   | 12                           |
| 4. Технически средства и реализация .....                                                                 | 14                           |
| 4.1. Проектиране и изграждане на ИОТ сензорни мрежи.....                                                  | 14                           |
| 4.2. Проектиране и изграждане на ИОТ сензорни устройства.....                                             | 15                           |
| 4.3. Анализ и избор на сензори и сензорни групи .....                                                     | 17                           |
| 5. Проектиране и реализиране на софтуерни инструменти за събиране на информацията .....                   | 18                           |
| 6. Проектиране и реализиране на софтуерна инфраструктура за обработка и визуализация на информацията..... | 19                           |
| 7. Изводи от Втора глава .....                                                                            | 21                           |
| <b>ГЛАВА 3. РЕЗУЛТАТИ, АНАЛИЗИ, ДИСКУСИЯ И БЪДЕЩИ ПЛАНОВЕ .....</b>                                       | <b>21</b>                    |
| 1. Реализация на основните модули и компоненти на платформата .....                                       | 22                           |
| 2. Анализ на първичните резултати и тестване на данните .....                                             | 27                           |
| 3. Бъдещи планове и насоки за изследвания по темата .....                                                 | 29                           |
| 4. Изводи от Трета глава .....                                                                            | 30                           |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>                                                                                    | <b>30</b>                    |
| Резултати от научното изследване .....                                                                    | 31                           |
| Апробации .....                                                                                           | 31                           |
| ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....                                                                    | 31                           |
| БИБЛИОГРАФИЯ .....                                                                                        | 31                           |

# УВОД

Съвременните дигитални технологии и приложението на алгоритми и модели от изкуствения интелект предоставят все по-широки възможности за обработка на данни в динамично променяща се среда, както и предоставянето на подходящи услуги за потребителите във всички сфери на нашия живот. Селското стопанство се превръща във все по-актуална област на изследване в областта на IoT (Интернет на нещата). Моделирането и прототипирането на интелигентни системи в сферата на животновъдството осигуряват подходяща среда за оптимизиране на производствените процеси във фазата на предварителната разработка на тези системи. У нас Концепцията за дигитална трансформация на българската индустрия на Министерството на икономиката на Република България определя като ключова необходимост подобряването на качеството на селскостопанските продукти чрез използването на интелигентни системи, които подпомагат управлението на технологичните процеси чрез възможността на автоматизиран мониторинг, събиране на данни и прилагане на подходящи алгоритми за анализ. Националната научна програма за интелигентно селско стопанство в България, в частта си за интелигентно животновъдство, си поставя като основна задача използването на IoT за наблюдение на околната среда, здравето, развитието, поведението и възпроизводството на говедата, във връзка с моделирането на биологично подходящи технологии за отглеждане.

В съответствие с основните насоки в развитието на дигиталното общество и базовите стратегии, насоки и нормативни документи са определени основните цели и задачи на настоящото дисертационно изследване.

## **Основна цел:**

***Изследване на възможностите и изграждане на IoT-базирана кибер-физическа платформа за интелигентно животновъдство.***

За реализирането на тази цел са дефинирани следните няколко основни задачи:

## **Основни задачи на дисертационното изследване:**

- ✓ *Да се изследват необходимостта и възможностите за изграждане на IoT екосистема в областта на интелигентното животновъдство;*
- ✓ *Да се разработи подходяща софтуерна архитектура на платформата;*
- ✓ *Да се създаде прототип на софтуерна и хардуерна IoT платформа за интелигентно пасищно говедовъдство*
- ✓ *Да се предложи подход за обработка и анализ на получените данни за изследване поведението на кравите при пасищно отглеждане в създадения прототип.*

**Методиката** на научното изследване се базира на постъпков итерационен подход, който преминава през: запознаване с проблематиката; проектиране и разработка на различни подходи и модели; прототипиране; тестване и изводи. В хода на работата се проектираха, създадоха и тестваха различни прототипи при изграждането на сензорната мрежа и сензорните устройства, при разработката на система за събиране и контрол на информацията и при създаването на софтуерната система за анализ, обработка и визуализация на информацията.

Дисертационният труд има следната структура:

**Увод**, в който се представя разглеждания проблем, основните цели и задачи на дисертационния труд, както и общия подход и методиката на научното изследване.

**Глава 1. Мотивация и състояние на изследвания проблем.** В тази глава се представя необходимостта от разработка на IoT среди за интелигентно животновъдство. Освен това се разглеждат особеностите на IoT платформите и кибер-физическите и кибер-физическите-социални системи, като се обсъжда референтната архитектура на Виртуалното физическо пространствено ViPS, чрез която се моделира целевата системи като адаптация в областта на интелигентното животновъдство.

**Глава 2. Разработка на IoT платформа за интелигентно животновъдство.** В тази глава се описва софтуерната архитектура и отделните модули на IoT платформата за интелигентно животновъдство. Описват се техническите средства и се обсъжда проектирането и реализирането на сензорната мрежа, IoT сензорните устройства, софтуерните модули за събиране, обработка и визуализация на динамично постъпващата и натрупаната до момента информация. В тази глава се представя работата по реализирането на няколко последователни прототипа на отделни компоненти на платформата, според избраната методика на изследването.

**Глава 3. Резултати, анализи, дискусия и бъдещи планове.** Трета глава представя резултатите от реализирането на прототипите на IoT платформата за интелигентно животновъдство. Разглеждат се реализацията на сензорната IoT мрежа и IoT устройствата; получаването, предаването и обработката на неструктурирани, полу-структурирани и нормализирани данни; създаването на два последователни прототипа на софтуерната среда на Виртуалния оперативен център за обработка, анализ, калибриране и визуализиране на

получаваната информация. Представя се подход за обработка и анализ на получаваните данни и изводи за поведението и активностите на животните. Коментират се и насоките за бъдещо развитие, свързани с разработката на следващата версия на платформата и идеи за анализ и прогнозиране на поведението на кравите при свободно пасищно отглеждане.

**Заклучение** – обобщават се резултатите, получени в дисертационното изследване.

#### **Благодарности**

Исказвам благодарностите си на научните ми ръководители проф. д-р Станимир Стоянов и проф. д-р Тодорка Глушкова за помощта, подкрепата, идеите, насоките и препоръките при провеждане на дисертационното изследване. Благодаря за възможността да участвам в научноизследователски и образователни проекти, осигуряващи възможност за популяризирането на получените резултати.

Благодаря на екипа от катедра „Животновъдни науки“ на Аграрния университет и лично на проф. д-р В. Николов и гл. ас. д-р Радка Малинова както и на гл. ас. д-р Пенчо Малинов от катедра Компютърни системи за оказаното доверие при включването ми в екипа, провеждащ изследвания в областта на интелигентното пасищно животновъдство.

Благодаря на членовете на катедрата за тяхната подкрепа и препоръки.

## **ГЛАВА 1. МОТИВАЦИЯ И СЪСТОЯНИЕ НА ИЗСЛЕДВАНИЯ ПРОБЛЕМ**

### **1. Мотивация за провеждане на дисертационното изследване**

Получаването на биологично чисти хранителни продукти в екологично чиста среда определя необходимостта от разработване на интелигентни системи за пасищно говедовъдство. Съвременните дигитални технологии предоставят възможност за анализ на данни и вземане на решения в динамично променяща се среда, което осигурява необходимата база за развитие на успешно интензивно животновъдство [1]. Селското стопанство се превръща във все по-актуална област на изследване в областта на IoT (Интернет на нещата) [2], CPS (Cyber-Physical Systems) [3] и CPSS (Cyber-Physical-Social Systems) [4].

Националната научна програма за интелигентно селско стопанство в България, в частта си за интелигентно животновъдство, си поставя като основна задача използването на IoT за наблюдение на околната среда, здравето, развитието, поведението и възпроизводството на говедата, във връзка с моделирането на биологично подходящи технологии за отглеждане. При свободното отглеждане на говеда контролът на целия процес е от особено значение поради необходимостта от бърза и навременна намеса на фермера за по-пълно задоволяване нуждите на животните. Този процес обаче се възпрепятства от различни фактори като: отдалечеността на пасищата от ферми и населени места; труден достъп до високопланински пасища; недостатъчна интернет и мрежова свързаност в тези райони; необходимостта от непрекъснат мониторинг на големи труднодостъпни зони; необходимостта да се обработва и анализира динамично постъпваща информация, свързана със състоянието на животните, както и това на пасищата и много други.

На база установени добри практики и споделен опит от специалисти в областта, ние си поставихме за цел да създадем прототип на хардуерна и софтуерна платформа и да разработим модели за поведението на крави при пасищно отглеждане. За провеждане на изследванията е необходимо да се решат редица технологични проблеми, а именно: необходимо е да се създаде сензорна мрежа, покриваща големи по площ територии; използваните сензори трябва да са в състояние да предложат автономен режим на работа за голям период от време; освен получаване на сензорни данни за верифициране на модела на поведение на животните са необходими допълнителни физически наблюдения, изискващи човешки ресурс и участието на експерти в областта; след получаването на данните е необходим процес по целева нормализация на данните, според верификацията от специалисти и др.

Напредъкът в хардуерните дигитални технологии и безжичните мрежови връзки създават възможността за изграждане на енергийно ефективни, многофункционални и евтини мрежови устройства. Тези устройства представляват сензорни възли, разпределени в определена географска област. Сензорните възли си сътрудничат помежду си, за да реализират така наречената сензорна мрежа. Сензорната мрежа може да осигури достъп до информация по всяко време и навсякъде, чрез събиране, обработка, анализиране и разпространение на данни. По този начин мрежата активно участва в създаването на интелигентна среда [19].

IoT сензорът на практика е устройство, което измерва физическа величина и я преобразува в сигнал, който може да бъде разчетен от наблюдател или от инструмент. Сензорът получава стимул от околната среда и реагира с електрически сигнал и генериране на дигитална информация. Сензорите измерват конкретна величина, но за създаването на кибер-физическа интелигентна платформа е необходимо тези сензори да се съчетаят в цялостно

**мултисензорно устройство**, където информацията се събира, анализира, обработва и изпраща към сензорната мрежа посредством изчислителен процесор.

## 2. CPS и CPSS платформи

В наши дни **Кибер физическите системи (CPS)** набират все по – голяма известност и популярност в почти всички сфери на бизнеса, образованието и живота на хората. CPS са системи от ново поколение, които интегрират в себе си изчислителни и физически възможности взаимодействащи с реалния свят посредством новосъздадени и актуални модели. Възможността на технологиите за връзка и взаимодействие на виртуалния с реалния свят се сформира на нови нива включващи: изчисления, контрол, комуникация, взаимодействие и разбиране [5]. От своя страна **Кибер физическите и социални системи (CPSS)** са ново поколение на CPS, което включва също и социалния аспект. За постигане на максимално пълна симбиоза между човека и компютърния свят CSP съвместно с IoT, както и съвременните мрежови комуникации, осигуряват възможността за проектиране и реализиране на CPSS, която система се базира и взема предвид човешкия фактор и своевременното взаимодействие с работата и управлението на системите **Error! Reference source not found..**

Осигуряването на качествена и биологично чиста храна е една от основните задачи в съвременното развитие. Това води до постоянно нарастване и завишаване на изискванията, рационализацията и натовареността във фермите отглеждащи едър рогат добитък. Повишава се нуждата от въвеждане и използване на автоматизирани интелигентни системи, които да оптимизират целия цикъл на производство и реализация на продукцията. Потенциалът на съществуващите системи, управляващи производствените процеси, е силно занижен, поради липсата на достатъчно ефективна комуникация и общо интелигентно управление на цялостната структура от информация и услуги. Ето защо CPS и CPSS могат радикално да променят ситуацията като осигуряват нови възможности и перспективи. Темата за създаване на интелигентни мултиагентни CPSS системи в областта на животновъдствата е особено важна и перспективна, но поради сложността на изследванията и трудността в изграждането на такива системи, касаещи поведението на животински видове, областта не е изследвана в достатъчна степен. Особено предизвикателна за научната общност е темата за създаването и използването на CPSS системи за **пасищно отглеждане** на едър рогат добитък. Проблемите са свързани с динамичното наблюдение на животните в естествената им среда, както и с формализирането на тяхното поведение и състояние. Не стои така въпроса с наблюденията и управлението на процесите, свързани с крави отглеждани във ферми, тъй като там животните обитават сравнително малки територии – обори, в които може да бъде осигурена контролирана околна среда [7].

Проблемите представени пред отглеждането на едър рогат добитък на принципа на свободното пасище засяга най-вече технологичната реализация и трудната достъпност до голяма по площ зона. Това е и причината за насочването на настоящото изследване към точно тази специфична предметна област. Оскъдната информация, свързана с формализирането на поведението и състоянието на животните при пасищно отглеждане е основната ни мотивация за работа в областта. Една от целите на изследването е да се реализира тестови модел за формализация на поведението на животните в рамките на кибер-физическа платформа, както и приложението на този модел при свободното отглеждане на едър рогат добитък.

Виртуално-физическото пространство (ViPS) е разработено от екипа на DeLC лабораторията при Пловдивския университет. Това е референтна архитектура, базирана на IoT, която може да се адаптира към различни CPSS-приложения в разнообразни области [9], [10]. Софтуерните компоненти и агенти във ViPS взаимодействат според условията на физическата и виртуалната среда, както и според техните знания и разбирания [8]. Обикновено при създаването на конкретно ViPS-приложение, се адаптират отделни компоненти на архитектурата, като се добавят и интегрират модули, специфични за разглежданата предметна област. ViPS-архитектурата включва два набора компоненти:

- **Компоненти с общо предназначение:** Този тип компоненти целят да доставят обща функционалност за всяко CPSS приложение, независимо от конкретната приложна област. Адаптивността е съществена характеристика на компонентите. Концепцията за IoT екосистема се базира на способността на тези интелигентни обекти да наблюдават, установяват, обработват, анализират и реагират подходящо на промените в околната среда. Горепосочените възможности ги правят автономни, проактивни единици, които споделят знания и информация с други IoT устройства [11].

- **Специфични компоненти:** Групата включва компоненти, специфични за прилагане в съответната предметна област - например земеделие [12]**Error! Reference source not found.**; образование [12]; туризъм [14], [15] и други.

ViPS предоставя опции за съхранение на тези компоненти в специализирани хранилища, което ги прави неразделна част от цялостната архитектура. Разработваната система за интелигентно животновъдство е конкретна адаптация на референтната ViPS архитектура.

Кибер-физическите системи интегрират компютърни алгоритми с физически процеси и играят важна роля в различни области, включително интелигентното животновъдство. В контекста на интелигентното животновъдство, машинното обучение (ML) подпомага оптимизацията на производството, мониторинга и управлението на ресурсите [16]. Основните предимства на машинното обучение в кибер-физическа среда са: прецизност, автоматизирано откриване на аномалии (например болести или отклонения в поведението на животните), мониторинг на здравето на животните, оптимизация на ресурсите и устойчиво развитие (вкл. анализ на екологичните условия и намаляване на въглеродния отпечатък). Съществуват и някои проблеми и предизвикателства, като: достъп и качество на получаваните данни; някои изчислителни ограничения (например в отдалечени планински ферми), интероперативност между системите при използване на различните технологии и софтуерни платформи; обучение на моделите; киберсигурност, технически и финансови проблеми. За решаването на различни проблеми в интелигентното животновъдство могат да се използват различни AI модели, които можем да обобщим в следните направления:

- *Регресионни модели*, които се използват за предсказване на производителността на животните въз основа на различни фактори. Например, за прогнозиране на млеконадоя на база здравословното състояние и хранителните навици на животните.
- *Методи за клъстеризация*, които помагат за сегментиране на животните в групи на базата на техните характеристики, поведение, здравословно състояние, производителност и др., което позволява по-добро управление на стадата.
- *Дървета на решенията*, чрез които може да се направи класификация и предсказване на заболявания, анализирайки различни характеристики на животните.
- *Невронни мрежи (Deep Learning)*. Използват се за обработка на сложни данни, като изображения и звуци, например за разпознаване на поведение или анализ на изображения за мониторинг на поведението на животните, откриване на рани или други здравословни проблеми. Обучението с подкрепление (Reinforcement Learning) може да се използва за оптимизация на процесите в реално време, като например автоматизация на храненето.

Поради нарастващата сложност, несигурност и размери на данните в редица системи, конвенционалните методи често срещат пречки, когато се опитват да решат проблеми изискващи взимането на решения и прилагането на контрол. Машинното обучение с дълбоко подсилване (DRL) е метод, управляван от данни, и се счита за базово приложение на изкуствения интелект (AI). DRL е комбинация от дълбоко обучение (DL) и обучение с подсилване (RL). Тази област на изследване е приложена за решаване на широк спектър от комплексни проблеми, изискващи вземането на решения **Error! Reference source not found.** DRL съчетава способността за представяне на функции на дълбокото обучение (DL) със способността за вземане на решения на RL, така че да може да постигне пълнофункционален контрол на машинното през целия процес на реализация [17], [18].

Интегрирането на интелигентни технологии за прецизирането на процесите е от особено значение за интелигентното селско стопанство и в частност животновъдство. Селскостопанската и в частност животновъдната екосистема е сложна, многовариантна и до голяма степен зависи от фактори с ниска предсказуемост. За да се посрещнат тези трудности, тази комплексна структура трябва да бъде по-добре разбрана чрез непрекъснато наблюдение, измерване и анализиране на различни физически характеристики и събития. Това се реализира по сравнително лесен начин чрез анализ на големия обем от информация с помощта на съвременните информационните и комуникационни технологии, които се използват както за краткосрочно и дългосрочно управление на земеделски и животновъдни ферми, така и за широкомащабен екологичен мониторинг. В това отношение една от най-приложимите технологии е WSN (Безжични Сензорни Мрежи) [20] в комбинация с алгоритмите за машинно обучение. WSN е изградена от по-голям брой IoT възли, които са инсталирани на ключови точки и събират данни, преди да ги предадат на базовата станция за последваща обработка. Въпреки това, за големия брой сензорни възли са необходими мащабируеми и ефективни алгоритми.

Текущият дисертационен труд се фокусира върху моделирането и прототипиране на CPSS платформа за пасищно животновъдство чрез приложение на различни технологии с цел оптимизиране на отглеждането на едър рогат добитък. В това изследване са описани различни проблеми, възникващи в WSN относно прилагането на технологията в областта на интелигентното животновъдство и възможностите за тяхното решение.

### **3. Изводи от Първа глава**

1. Разработването на интелигентни платформи за пасищно екологично животновъдство е от особена важност за съвременното развитие.
2. Приложението на CPSS технологиите е подходящо за разработването на целевата платформа.
3. Използването на алгоритми за ML и в частност на DRL върху данните, получени от подходящо структурирани IoT сензорни мрежи е удачен подход за динамично управление на поведението и активността на животните.

## **ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА НА IoT ПЛАТФОРМА ЗА ИНТЕЛИГЕНТНО ЖИВОТНОВЪДСТВО**

### **1. Базова постановка и подходи за изграждане на системата за интелигентно животновъдство**

Разработваната IoT среда за интелигентно животновъдство е конкретна адаптация на референтната CPSS архитектура на Виртуално-физическото пространство ViPS. Обикновено при изграждането на конкретно ViPS-приложение се адаптират само отделни компоненти на архитектурата, като се добавят и интегрират модули, специфични за разглежданата предметна област. ViPS - архитектурата съдържа два набора от компоненти – такива с общо предназначение и специфични за съответната област. Първата група са компонентите с общо предназначение. Тяхната цел е да се достави обща функционалност за всяко CPSS приложение, независимо от конкретната приложна област. Съществена особеност на тези компоненти е тяхната адаптивност. Концепцията за създаване на IoT екосистема се основава на способността тези интелигентни обекти да наблюдават, установяват, обработват, анализират и реагират по подходящ начин на промените в околната среда. Всички тези възможности ги определят като автономни, проактивни единици, които са в състояние да споделят знания и информация с други IoT и заедно да планират и вземат решения, за постигане на индивидуални или споделени цели. Освен това трябва да могат да комуникират безпроблемно помежду си в мрежа и да са в състояние да формират йерархична мрежова структура.

Втората група включва компоненти, специфични за приложението в съответната предметна област. ViPS предоставя опции за съхраняване на тези компоненти в специализирани хранилища, като по този начин ги прави неразделна част от цялостната архитектурата. В следващата част ще разгледаме по-обстойно втората група компоненти, които предоставят специфични функционалности, необходими за функционирането на IoT платформата за интелигентно животновъдство. Поради широкия обхват на изискванията, както и сложността на задачите, беше необходимо да се проведат задълбочени и детайлни проучвания и анализи, както на цялостната софтуерна архитектура, така и на отделните компоненти, възли и свързващи елементи.

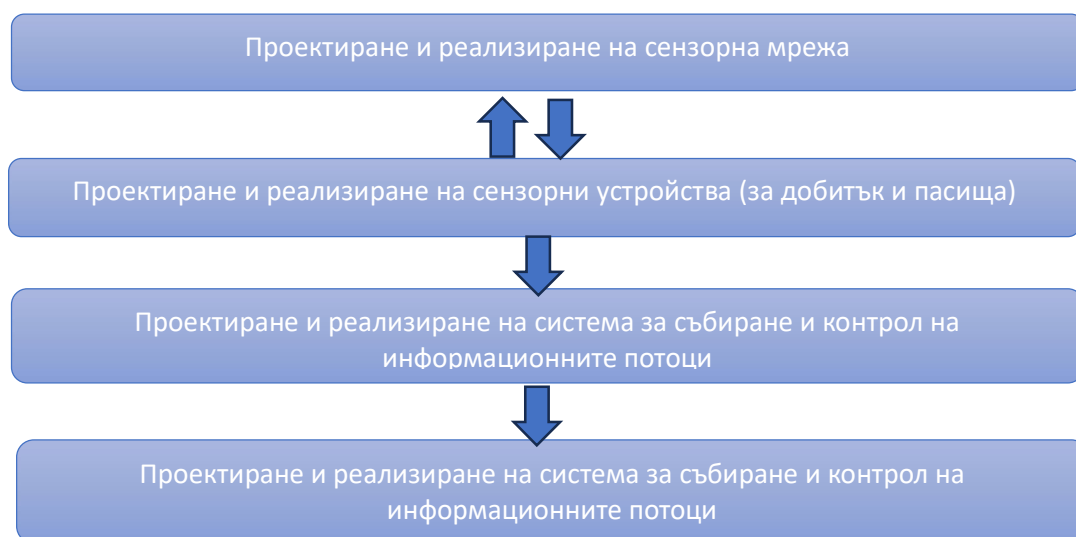
Първоначалният анализ имаше за цел да определи подходящите архитектурни компоненти, които са необходими за реализиране на система, способна да решава предварително заложените задачи и проблеми. В световен мащаб съществуват различни сходни системи (съответно и архитектурни решения), които бяха анализирани като потенциални такива за решаване на конкретния проект. След първоначалния анализ дефинирахме 4 основни направления за развитие и детайлизиране на архитектурния модел на системата, както следва (Фиг.1) :

- Проектиране и реализиране на сензорна мрежа;
- Проектиране и реализиране на сензорни устройства (за добитък и пасища);
- Проектиране и реализиране на система за събиране и контрол на информационните потоци ;
- Проектиране и реализиране на интелигентна софтуерна система за анализ, обработка и визуализация на информацията.

Основният проблем при изграждането на цялостния архитектурен модел се основава на проектиране и реализиране на първите три слоя от системата, които имат за цел да осигурят ненормализираните данни към интелигентните модели в четвъртия архитектурен слой. Следвайки методиката на текущото научно изследване разработката на отделните компоненти, както и цялостната платформа следва постъпков итерационен подход. В хода на работата се проектираха, създадоха и тестваха различни прототипи както при изграждането на сензорната мрежа и сензорните устройства, при разработката на система за събиране и контрол на информацията, така и при създаването на софтуерната система за анализ, обработка и визуализация на информацията.

В съответствие с горепосочения подход разработих постъпкова методика, която да спомага за последователно откриване и решаване на основните проблеми, както и паралелно анализиране на

взаимодействието на цялостната архитектура спрямо нововъзникналите проблеми. Първоначално се съсредоточих върху вида на крайната информация на базата, на която използваните алгоритми да постигнат по – добри резултати. Проведах се изследвания в областта на алгоритмите на модела и се установиха подходящите за настоящото изследване.



**Фигура 1.** *Подход за изграждане на архитектурния модел*

Следващият основен проблем е събирането на ненормализираната информация от животните и пасищата. Изследването се фокусира върху две отделни области:

- изграждане на IoT сензорни мрежи
- създаване на сензорни устройства за животни и пасища

Вниманието в дисертационния труд е насочено към изследване на поведението на едър рогат добитък, който пасе на открито на широкообхватни пасища. Ето защо е необходимо да се проектира и внедри широкообхватна енергоефективна сензорна мрежа, която да се базира на малък брой ретранслатори с голям обхват. Базирайки се на основните проблеми и анализирането на технологичните подходи се спряхме на IoT сензорна мрежа, базирана на LoRa технология, която позволява преноса на данни на големи разстояния, както и максимизиране на енергийната ефективност. След избора на технологията и метода на изграждане на сензорната мрежа, следващият сериозен проблем беше проектирането и реализацията на динамични, енергийно ефективни сензори с автономно хранване и малки по обем, които да се прикрепят удобно към всяко отделно животно. От изключителна важност за работа на алгоритмите за анализ е събирането и обработката на информация от голям брой животни. Броят на изследваните животни значително завишава способността на модела за самообучение и съответно прецизност. Основните проблеми, които можем да дефинираме на този етап са трудни за решаване, предвид поставените изисквания, както следва:

- Изключително висока енергийна ефективност, позволяваща на сензорите автономна работа за минимум 6 месеца.
- Внедряване на изчислителна мощност във всеки индивидуален сензор, позволявайки му да събира, обработва и частично да нормализира информацията от всеки датчик в сензора (сваляне на част от интелигентността на системата на ниско ниво).
- Подбор на точните датчици, които да събират използвана информация за нуждите на крайните цели на проекта.
- Минимизиране на обема на информационните потоци, който се изпращат към сензорната мрежа с цел постигане на голям обхват.
- Малки по обем сензори, който имат възможност по хуманен начин да се закрепват към всяко животно, както и да гарантира, че няма да пречи на животното и да допринася за неговото раздразнение.
- Изключителна здравина и издръжливост на сензора, позволяваща му да издържи на реактивните напрежения, физически удари, атмосферни влияния и поведение на животното.

След установяването на основния подход на изследването, основополагащите технологии, както и прототипната реализация на сензорите и сензорните мрежи, продължих с паралелното проектиране и решаване на софтуерните архитектурни модели, осигуряващи процесите на събиране, съхраняване и нормализиране на големи обеми от данни. Тази информация постъпва в динамичен режим от всеки сензор и трябва да бъде подходящо обработена в подходящ вид за генериране на изводи и заключения посредством статистически

методи и AI. Анализирайки подходящите подходи и архитектури за събирането, съхраняването и декриптирането на сензорната информация, се стигна до заключението за използване на SQL бази данни с разширени възможности за скалируемост и бързодействие. Този избор е обоснован от гледна точка на скалируемостта на системата и пристигащата информация за единица време. Спрях се на този подход, поради проблема за събиране на информация от N на брой сензори и съпадението на времевите измерения (т.е. няколко сензора могат да изпратят информация в една милисекунда). От изключителна важност е първоначалното съхранение на данните да осигури модел на работа, при който да сме сигурни, че нито една от транзакциите няма да бъде загубена и всички ще са в консистентен и коректен вид за последващата обработка.

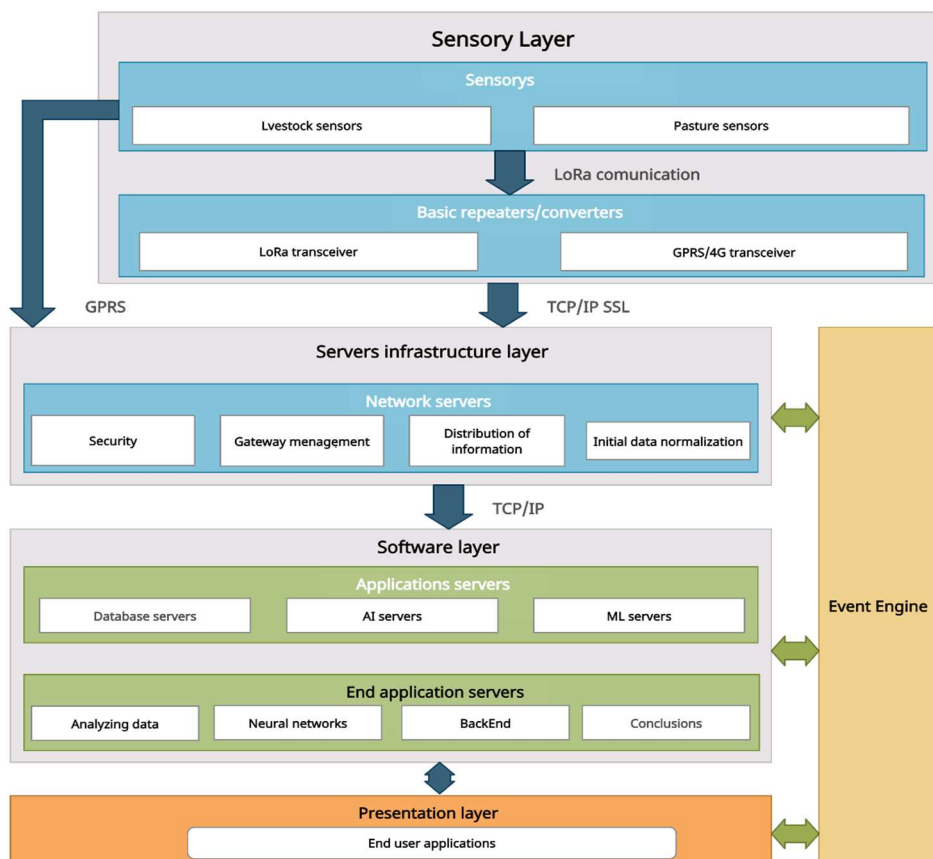
## 2. Детайлен преглед на архитектурата на IoT система за интелигентно животновъдство

Базирайки се на обобщения преглед предстен в предходната част, тук ще се фокусираме по-детайлно върху архитектурата на системата. Както беше вече разгледано по-горе, цялостната система е изградена на базата на многослойна архитектура, състояща се от следните слоеве (Фиг. 2):

- Сензори и сензорни групи (за животни и пасища)
- Сензорна мрежа
- Инфраструктурна свързаност между сензорната мрежа и функционалните сървъри.
- Сървърен слой за първично съхранение на информация.
- Сървърен слой за приложни бази данни (включително релационни и нерелационни бази данни).
- Слой за обработка и анализ на данни (включително системи и методи за анализ, обработка).
- Приложен функционален слой за систематизиране на данните
- Клиентски слой за визуализация на информация в систематизиран вид

Този модел осигурява гъвкавост и фокус върху отделни проблеми, разпределени в многослойна софтуерна система и съдържа **три основни компонента**:

- Статични и динамични сензори.
- Преносима и инфраструктурна среда.
- Предоставяне на софтуер за управление и анализ.



Фигура 2. Инфраструктурна диаграма на архитектурните слоеве

На най-ниското ниво се базират сензорните групи (съвкупност от сензори с различно предназначение). Те са разделени на две отделни части: динамични и статични сензори.

**Динамични сензори** - Всяко животно притежава IoT сензорно устройство с набор от различни датчици. Сензорното устройство се прикрепя към животното посредством каишка, която не смущава и не пречи на нормалното поведение на животното. Въз основа на измерванията и ефекта от тези измервания върху резултата, се извършиха редица експерименти върху размера, разположението, теглото и други параметри на сензорите. Крайното сензорно устройство е проектирано по начин, който не смущава или пречи на нормалния жизнен цикъл на животното. Изследването позволи да се определят оптималните параметри, при които измерването не нарушава поведението или биологичния цикъл на кравите. Проектирането и релизирането на IoT устройствата е от критично значение за данните, поради така наречените „шумове“ генерирани от поведението на животните след прекрепване на сензорното устройство. Този проблем беше решен, чрез редица тестове на различни дизайни и работа на устройствата, които позволиха да се осигури максимален комфорт на изследваните животни, както и високо ниво на истинност и коректност на информацията.

**Статични сензори** - Втората група сензори е предназначена за статичен монтаж върху избрани пасищни обекти, като по този начин се анализират метеорологичните данни, както и данните за почвата и други физически параметри на конкретните пасища. Тези сензори имат значимо влияние върху цялостната интеграция на параметрите на поведението на животните по отношение на тяхната среда и индикаторите от реалния свят. Синхронизирането на поведенческите данни на отделното животно спрямо хабитата (пасището), което обитава в конкретния времеви диапазон, формира пълна информационна картина върху наблюдаваните параметри.

Прилагането на двата основни типа сензори, както и синтезът и съпоставянето на входящата информацията, разкрива потенциала за генерация на пълна картина на поведенческите характеристики на отделните животни, стадните навици и други параметри, пречупени през призмата на данните за тяхната среда. Двата вида сензори са оборудвани с групи от датчици, отчитащи елементи и блокове за максимална точност при идентифициране на отделните параметри. Непосредствено, всеки сензор е реализиран на базата на микропроцесор, който има способността да извършва процеси на първична нормализация на получените данни с помощта на математически и програмни алгоритми, които спомагат за извеждането на първичните заключения и минимализиране на потока от изходна информация. За стабилната и дългосрочна работа на сензорите беше необходимо да се извършат редица изследвания, както и да се тестват различни подходи, свързани с избора на комбинации на сензори, програмни и математически алгоритми. Крайните задоволителни резултати бяха постигнати след тестването и анализирането на над 15 различни модела и комбинации от софтуерни и хардуерни прототипа. Целта беше постигането на възможно най-висок процент истинност и уместност на информацията.

В процеса на изследване не на последно място беше обърнато внимание на хуманното отношение към животните. Това е основен допълнителен параметър, затрудняващ изследването, поради различните типове породи и поведенчески параметри на самата порода и конкретния индивид. Въз основа на над 40 тестови животни в различни локации, породи, възрасти и полове, се установиха приемливи параметри за нормалната интеграция на сензорните групи по отношение на животните.

Успоредно със сензорния слой се извършват анализи, тествания и изследвания в областта на **транспортния и сървърен слоеве** на цялостния проект. Работата по основните три слоя се извършва в синхронен и асинхронен режим, което осигурява максимална съвместимост и спестява време, поради паралелното решаване както на конкретни за отделния слой, така и общи за цялата система проблеми. В процеса на работата за избор на подходящите инфраструктурни решения за пренос на данни се извършиха детайлни проучвания на наличните технически решения, както и анализ на конкретната проблемна област. Като резултат се установиха три важни изисквания:

- Необходимост от максимален обхват на сензорната мрежа.
- Максимална енергийна ефективност на всеки отделен сензор.
- Използване на обявените свободни радиочестоти за предаване на данни, отговарящи на всички европейски и международни стандарти и изисквания.

В етапа на проектиране, тестване и анализ се установиха редица проблеми при използването на повечето стандартни технологии, като WiFi, Bluetooth, Zigbee, GPRS, LoRa и др. Анализът доведе до избора на две технологии, решаващи повечето проблеми- LoRa [21] и GPRS. В резултат избрахме като основна технология за пренос на информация от сензорите към сензорните мрежи LoRa. Технологията осигурява покритие на до 10 квадранти километра с една централна станция (според локализационните и географските дадености на терена), както и линейно увеличаване на обхвата без ограничения чрез добавяне на допълнителни станции. От друга страна GPRS комуникацията, въпреки някои недостатъци, осигурява голяма част от необходимите

функционалности. Този тип преносна технология е подходяща за по-малки групи от животни, осигурява работа на IoT сензорите посредством съществуващите GSM станции, предоставени от операторите на тези услуги. Въпреки тези предимства са установени проблеми, като: липса на покритие на GSM кулите в някои региони; завишаване на енергийната консумация на сензорите; значително завишаване на стойността на сензорите; завишаване на трудността на прилагане.

За реализацията на проекта и базирайки се на всички законови изисквания и конвенции беше избран честотен диапазон на т.н. отворени/свободни за ползване честоти, както следва 868Mhz за Европа и 433 за други страни с различни разпоредби. Честотният диапазон отговаря на местните държавни разпоредби за радиоразпръскване. Втората изследвана технология GPS свързаност се ориентира към други честотни диапазони GPRS - 850/900/1800/1900MHz. Постигнатите резултати бяха релевантни на поставените цели и надминаха предварителните очаквания, достигайки изключително добра радиопроводимост с не повече от 12% загуба на предаване на територии и свързаност до 10km. Гореспоменатите изследвани подходи и технологични решения ни позволиха да оптимизираме софтуерните и хардуерните компоненти за максимална енергийна ефективност и зависимост. Постигнахме средно **9 месеца** живот на батерията на динамичните сензорни групи при изпращане на данни на всеки 10-20 минути.

**Третият основен компонент** е свързан със създаване на софтуерна инфраструктура, анализ на данните, използване на подходящи алгоритми, управление на събития и др. Като следствие от събирането на данните, анализът в реално време и представянето на достатъчно точни заключения въз основа на цялостната информация, значително задълбочиха проектирането, анализирането и дизайна на софтуерните слоеве и тяхната, способност да осигуряват обработката на входящия обем от полунормализирана информация. Осигурявайки данните към сървърите от сензорите, чрез сензорните мрежи, софтуерният слой е проектиран и базиран на съвременни технологии, което му позволява паралелна обработка на големи обеми информация, както и анализ на информацията в реално време. Направено е проучване за приложение на различни статистически и AI алгоритми (в частност „Дълбоко усилено учене“), с цел да се позволи на системата да анализира и взема решения, базирайки се на историческа, статистическа и новополучена информация. Бяха извършени тестове на редица алгоритми в областта на машинното обучение и други инструменти и технологии, свързани с предметната област, като целта е непрекъснато да повишаваме достоверността на изводите и анализите, предоставени от системата.

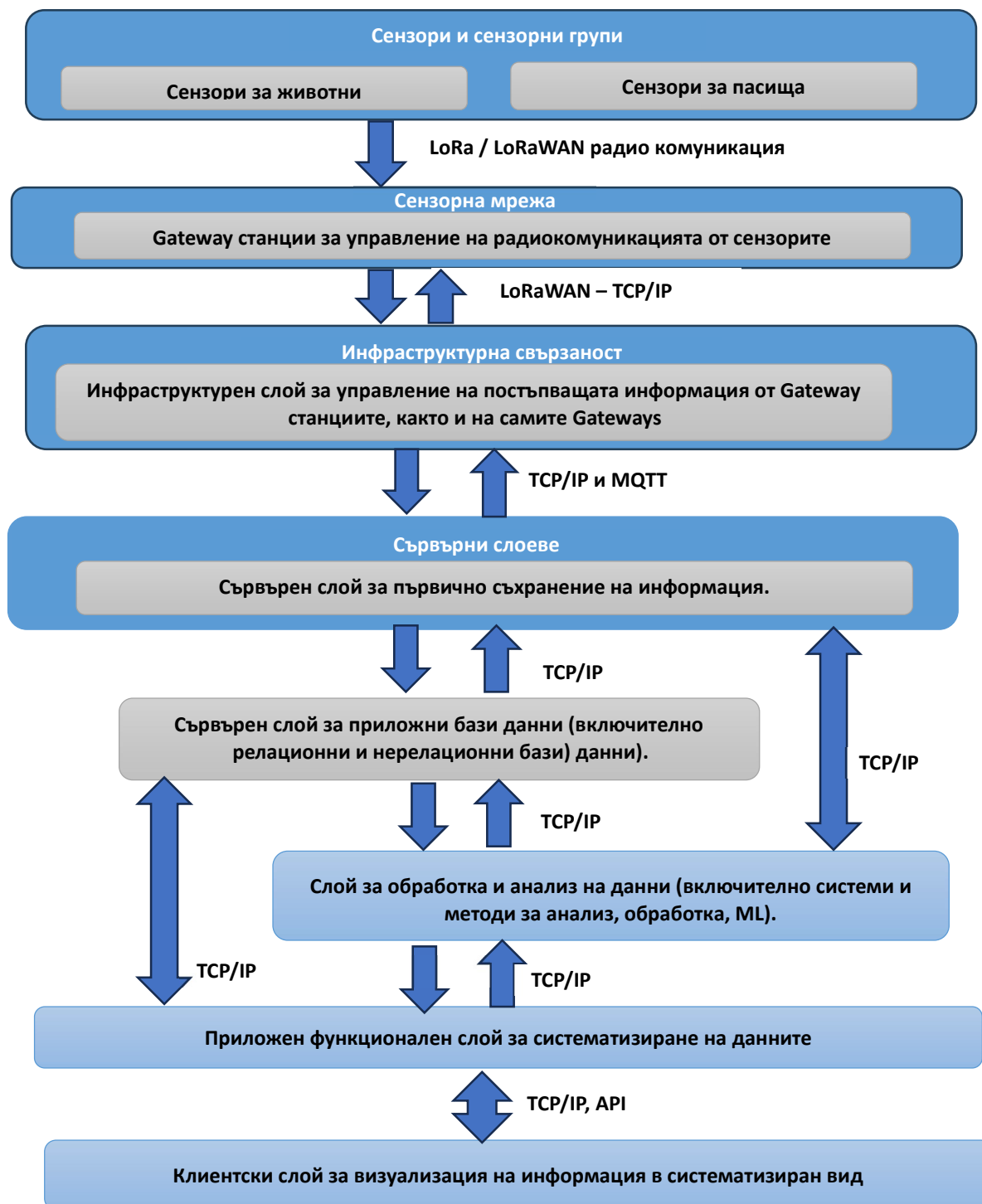
Навременната оптимизация на всеки от споменатите слоеве, базирана на реални тестове и наблюдения, както и верификации от зооинженери и технически инженери ми позволиха да оптимизирам всеки аспект на проекта, като се експериментира с много технологични, концептуални, математически и други решения и инструменти. Чрез оптимизиране на всеки експеримент на базата на предишни проучвания и постигнати резултати, като целта беше да се достигне високо ниво на точност на изводите, предоставени от цялостната система.

### **3. Взаимовръзки и описание на компонентите и слоевете, комуникация, протоколи, начин на свързване**

В продължение на предходната част, представяща инфраструктурните слоеве на системата и тяхното изграждане, ще продължим процеса на детайлизиране на взаимовръзките и начините на комуникацията между отделните слоеве. На следната фигура 3 е представен обобщен модел на комуникация, който предоставя общ изглед на свързаността и взаимодействието между отделните слоеве и компоненти. Визуализирани са отделните слоеве, свързаността между тях, както и видовете комуникационни протоколи и технологии за осъществяването на непрекъснат и стабилен обмен на информация между крайните сензори и потребителите, използващи системата. Сложността на системата предопределя провеждането на задълбочен и детайлен анализ при структурирането и диференцирането на отделните слоеве и комуникация между тях.

Както е видно от фигура 3 започвайки от най-ниското ниво, за връзка между крайните сензорни групи и сензорни мрежи е избрана комуникационна технология LoRa. LoRa е физическа частна радиокомуникационна технология. Основана се на техники за модулация с разширен спектър, получени от технологията за разширен спектър. Технологията осигурява комуникационно решение за дълъг обхват, ниска мощност, гъвкав битрейт и ниско съотношение сигнал/шум към смущения [22]. В разширение на LoRa технологията, както и за комуникация между сензорите и сензорните мрежи, така и за комуникация между сензорните мрежи и инфраструктурния слой за управление на постъпващата информация от Gateway станциите, както и на самите Gateways се използва LoRaWAN широкообхватна мрежа. LoRaWAN дефинира комуникационния протокол и системната архитектура на свързаността [23]. LoRaWAN представлява официален стандарт на международния съюз по телекомуникации (ITU), ITU-T Y.4480.

LoRa и LoRaWAN съвместно дефинират мрежов протокол с ниска мощност и широко покритие предназначен за безжично свързване на устройства, работещи с батерии (сензорни групи), към интернет в регионални, национални или глобални мрежи. Предимствата и насочеността на технологията покриват ключови изисквания за „интернет на нещата“ (IoT), като: възможност за двупосочна комуникация, сигурност на комуникацията и възможност за мобилност и локализация. Използваната ниска мощност, занижената побитова скорост на изпращане и приемане на данните прави стандартна най – приложимия от гледна точка на разработваната IoT платформа. Скоростта на комуникацията от сензорните групи към сензорните мрежи и обратно варира от 0,3 kbit/s до 300 kbit/s на канал.



**Фигура 3.** Диаграма на връзките между слоевете на системата

Следващото ниво на инфраструктурна свързаност на базовите слоеве към сървърните слоеве се осъществява посредством TCP/IP и MQTT протоколи. Комуникацията между различните сървърни подслоеви, както и между основните: Слой за обработка и анализ на данните, Приложен функционален слой за систематизиране на данните както и Крайно- клиентския слой за визуализиране на информацията, се базират на използването на

TCP/IP протоколи. Споменатите слоеве имат необходимост от постоянен, двупосочен обмен на големи количества информация с редуциране и корекция на грешките при изпращане, които фундаментални особености и потребности притежава TCP/IP протокола. Те са изградени на сървъри снабдени с широколентова мрежова неограничена свързаност, поради, което няма затруднения в преноса на големи количества информация.

## 4. Технически средства и реализация

В текущата секция ще се обърне детайлно внимание на проведените изследвания и постигнатите резултати за избор и имплементация на всеки един от системните слоеве.

### 4.1. Проектиране и изграждане на IoT сензорни мрежи

За реализацията на основната цел се определят два аспекта при реализацията на IoT платформата- събиране на информация от всяка крава и обработването и анализирането на събраната информация. Ето защо първоначалните усилия и проучвания се насочиха към принципите, начините и методите за събиране на информацията. Проучвайки голям набор от съществуващи решения се оформиха следните няколко подхода за решаването на тази задача:

- Подход 1 - Дистанционно наблюдение на животните с помощта на високо-резолюционни интелигентни видеокамери. Камерите се монтират в сравнителна близост до животните, като след това с помощта на алгоритми за разпознаване на конкретни животински индивиди, както и алгоритми за разпознаване на поведенчески модели се предоставят полу-нормализирани данни до сървърите за обработка и анализ на данните.

- Подход 2 – прикрепянето на индивидуални сензори към всяко отделно животно, които сензори да колекционират информацията от поведението на животните. След определен период (периода трудно може да бъде по дълъг от 7-10 дни), сензорите се свалят от животното и посредством кабел, данните се свалят в сървърите за анализ на информацията.

- Подход 3 – Прикрепяне на индивидуални сензори към всяко животно, който събира информацията за поведението му, като след преминаване на животното в непосредствена близост до четищо устройство (монтирано примерно на вратата на обора или на хранилка по пасищата), се свалят безжично събраните данни и се изпращат към сървърите за обработка на данни.

- Подход 4 – Прикрепване на индивидуални сензори към всяко животно, които в реално време или през определени интервали безжично изпращат информация към сензорна мрежа проектирана и монтирана в обхвата на сензорите. Сензорната мрежа приема информацията от сензорите на животните и в реално време я изпраща на сървърите за обработка на информацията.

В по-голямата част от времето говедата се хранят и пасат на открити пасища, които често са отдалечени на значителни разстояния от фермата. Това изисква решения на някои конкретни проблеми като:

- Невъзможност за обслужване на животните в продължение на големи интервали от време (понякога от няколко седмици)

- Голяма отдалеченост на стадата крави от фермите

- Голям брой на изследваните животни

- Големи територии за паша на животните в повечето случай базирани на пресечени географски местности

- Необходимост от достъпност на информацията за всяко животно през малки интервали от време (не повече от час)

- Висока устойчивост на сензорите и сензорните мрежи при работа във външни условия като влага, високи или ниски температури, физическо увреждане и др.

Говедата прекарват по голямата част от годината на свобода, което автоматично изключва *Подходи 1 и 2*, при които животните трябва да са достъпни за камерите за видеонаблюдение или да се обслужват често от фермерите, който да свалят сензорите и да извличат информацията от тях. Продължавайки анализа с *Подход 3* се установи, че той не може да бъде приложен, поради техническата невъзможност на сензорите да работят автономно в режим на събиране на информация за период от 7-8 месеца, както и поради необходимостта за доставяне на тази информация в кратки периоди от време (максимум час), а не еднократно в края на пасищния период. Логичното продължение на сравнителния анализ изведе като една подходяща възможност за решаване на проблема последния *Подход 4*. Подходът осигурява решение на всички горепосочените проблеми, но за съжаление генерира и нови проблеми, като:

- Необходимост от изграждане на сензорна мрежа състояща се от приемни устройства (gateway) базирани на големи пасищни територии.
- Необходимост от автономно непрекъснато хранване на приемните устройства
- Необходимост от голям обхват на всяко устройство
- Необходимост от технологична възможност на едно IoT устройство да приема и обработва информацията от множество сензори.
- Необходимост от връзка на всяко IoT устройство със сървърите за събиране и обработка на информация.

За решаване на горепосочените проблеми бяха изследвани няколко основни комуникационни технологии и стандарти за връзка между сензорите и приемащите устройства:

- LoRa - физическа частна радиокомуникационна технология. Основава се на техники за модулация с разширен спектър, получени от технологията за разширен спектър.
- GSM - Глобалната система за мобилни комуникации е стандарт, разработен с цел да опише протоколите за цифрови клетъчни мрежи, използвани от мобилни устройства, като мобилни телефони и таблети [24].
- Wi-Fi – съвкупност от протоколи за безжична мрежова свързаност, базирана на стандарти IEEE 802.11, които обикновено се използват за локално свързване в мрежа на крайни устройства и достъпа им до интернет [25].
- Zigbee - базиран на спецификация за набор от комуникационни протоколи на високо ниво, използвани за създаване на частни мрежи с малки цифрови трансмитери с ниска мощност [26].
- Bluetooth - стандарт за безжична технология с малък обхват, който се използва за обмен на данни между фиксирани и мобилни устройства на къси разстояния и изграждане на персонални мрежи.

Изборът на подходяща за целта на изследването технология се базира на сравнителен анализ между тези комуникационни технологии и стандарти по отношение на техния обхват, енергийна ефективност, цена, брой обслужвани IoT устройства и мащабируемост, предназначение, устойчивост и големина на информационните пакети. От гледна точка, на най-важните параметри – обхват и енергийна ефективност, се спрях на LoRa и GSM технологиите. За нуждите на изискванията на разработваната платформа и преносна среда, това са двата най-необходими и непреодолими фактора. Разбира се, всяка от технологиите притежава редица недостатъци, поради което продължих анализа на избраните две технологии, което определя проектирането и реализирането на IoT сензорите и сензорните мрежи. В заключение подходящата за предметната област със своите преобладаващи предимства се оказа LoRa технологията за проектиране и изграждане на сензорните мрежи, която е основополагаща за работата по прототипирането на IoT платформата за интелигентно пасищно животновъдство.

## 4.2. Проектиране и изграждане на IoT сензорни устройства

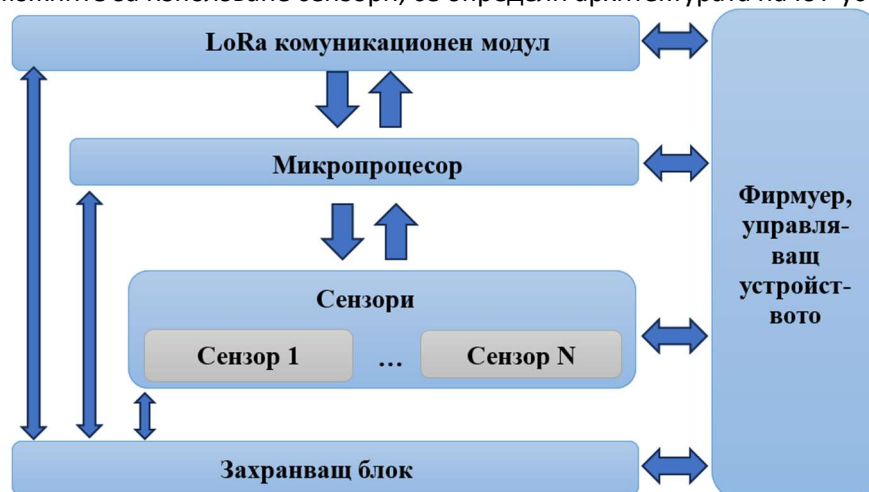
Следващата стъпка при реализацията на платформата е проектирането и създаване на IoT устройства, съдържащи определени набори от сензори, които имат способността за събиране и първична обработка на данните изпращани към сензорната мрежа. Проектираните IoT сензорни устройства трябва да бъдат прикрепени към всяко отделно животно и посредством приложените в тях сензори и микропроцесори да са в състояние да анализират първичната информация, да я представят в полунормализиран вид, след което да я изпращат към сензорната мрежа.

Анализът, проектирането и създаването на прототипи на IoT-устройствата се провеждат паралелно с анализа и проектирането на сензорните мрежи. Това беше необходимо от гледна точка на фактологичния анализ за използване на единна комуникационна среда за връзка на устройствата и сензорната мрежа. След избора на единна комуникационна технология (в случая LoRa) се установи основната компонента за реализация на мултисензорното устройство. Използваните подходи на работа и свързаните с това проблеми при реализацията на IoT-устройството (IoT възела) определиха необходимостта от изпълнение дейности в следните няколко направления:

- Определяне на нужните функционалности, които IoT-устройството трябва да извършва.
- Определяне на сензорните групи, които устройството трябва да притежава, за да реализира дефинираните функционалности.
- Определяне на цялостната архитектура и работа на IoT-устройството
- Определяне на алгоритмичната зависимост между сензорните и съответно микропроцесорно устройство, вградено в IoT възела.
- Решаване на проблеми свързани с енергийната ефективност, както и с промишления дизайн на IoT-устройството.

Следващата стъпка в процеса на проектиране на IoT устройството е определяне на неговата архитектура и прилежащите сензори за отчитане и събиране на данни за всеки животински индивид. За реализирането на прототипа на мулти-сензорното устройство използваме конвенционални сензори, които са достъпни за употреба, като фокусът се постави върху основните проблеми, които устройството трябва да реши и съответно информацията, която трябва да се обработи за: местоположението на животното; изминатото разстояние за единица време; поведението на животното, неговите действия и физиологично състояние. В процеса на работа се установи, че не съществуват сензори, които директно могат да диагностицират гореспоменатата информация. Това разви изследването ми в посока към избор на няколко сензора, чрез които информацията може да се съчетае и анализира, както и да се реализират определени изводи в полуформализиран първичен вид.

Решаването на този проблем изисква получаването на допълнителна експертна информация, поради което осъществих многократни срещи и консултации с зооинженери и специалисти по отглеждане на животни и поведенчески анализ. Това осигури възможността за по-пълно разбиране на поведението на животните в условията на разглежданата кибер-физическа среда. След приключване на първоначалния анализ на цялостната структура, както и възможните за използване сензори, се определи архитектурата на IoT-устройството (Фиг. 4).



**Фигура 4.** Архитектура на IoT сензорно устройство

Структурата определя целия процес на работа на устройството. Главната технологична единица е **Микропроцесора**, ангажиран със събирането, контрола, обработването и изпращането на информация, както и с работата на цялото устройство. **Комуникационният модул**, от своя страна също е микропроцесорно устройство със свой вътрешен процесор, но единствената му задача е да получи синтезираната информация от главния микропроцесор, да я обработи, да осъществи връзка със сензорната мрежа и да изпрати информацията. След това изчаква потвърждение за завършване на изпращането и приключва своя цикъл до следващата итерация. **Захранващият блок** се грижи за разпределяне на достатъчно количество енергия към всички модули, като този процес стриктно се контролира от главния микропроцесор. Контролът на този модул е важен за максимизиране на енергийната автономност на IoT устройството.

Практическото изпълнение на IoT сензорното устройство също премина през няколко стъпки, които бяха пряко зависими от итерационното развитие на целия проект. За комуникационния модул в устройството логично беше избрана LoRa технологията, с която се реализира и комуникацията между устройствата в сензорната мрежа. В съответствие с Комуникационния модул се направи избор на основния микропроцесор, към който се поставиха следните изисквания: ниска консумация на енергия; достатъчно на брой цифрови и аналогови комуникационни порта; поддръжка на различни видове комуникационни протоколи (необходими за връзка със сензорите); наличие на достатъчно изчислителна мощност за обработка на сензорната информация; наличие на възможност за лесно препрограмиране и извършване на тестове с различни видове на фирмуерното обезпечаване. След анализа на над 15 вида микропроцесори, които отговарят на поставените изисквания и над 60 теста и измервателни експеримента се избра микропроцесорното устройство с най-добри комплексни показатели, което в значителна степен отговаря на поставените изисквания.

Следващата стъпка наложи проучвания в областта на енергийните източници (в случая батерии) и електронни модули, осигуряващи висока ефективност (по възможност над 90%). Основния проблем при избора е оптималната и стабилната работа на всички модули на устройството спрямо размера на батерията и общата автономна работа на устройството. В резултат на многобройни експерименти беше избран подходящ вариант, който да отговаря на посочените условия.

Последната стъпка в процеса на реализация включва избора на подходящи сензори, създаване и реализиране на алгоритми за анализ на информацията от всички сензори и предоставяне на полунормализирани изведени данни, които да се изпращат към сензорната мрежа за последваща обработка. В следващата част ще разгледаме процеса на избор на сензори и сензорни групи, който е от решаващо значение за реализацията на проекта.

### 4.3. Анализ и избор на сензори и сензорни групи

Анализирането на информацията и разработката на модели, свързани с поведението и жизнения цикъл на животните, изисква непрекъсната обработка на данни, свързани с местоположение на животното, изминато от него разстояние за единица време, поведението му, определени от неговите движения и дейности. Проучванията първоначално се насочиха към отчитане на местоположението на животното и изминатото разстояние за единица време. За решаването на този проблем може да се използват две основни технологии: чрез използване на GPS устройство или чрез технологията за триангулация [27]. В условията на отдалечено пасищно отглеждане по-подходящото решение е използването на GPS сензор, който приема сигнали от глобалната GPS мрежа. Моделът с триангулирането е твърде неподходящ, тъй като е необходимо всяко IoT устройство да има връзка с минимум 3 наземни станции от сензорната мрежа, а процесорът да е в състояние да извършва изключително сложни триангулационни изчисления, за да определи една единствена позиция. От една страна, това би забавило работата на сензорното устройство и би нарушило енергийната ефективност. От друга страна, използването на тази технология би забавило преноса на данните в сензорната мрежа. Ето защо беше избрана GPS технологията. Поради наличието на голямо разнообразие от такива сензори, беше направен избор на конкретен сензор, който да отговаря на следните изисквания:

- висока енергийна ефективност;
- висока точност на отчитане;
- висока скорост на отчитане;
- минимален размер.

Измерването на изминатото разстояние от всяко животно се базира на елементарни математически изчисления на база последователните измервания на GPS сензора.

За измерване и анализ на активностите и поведението на животното се отдели основното време за анализ на сензори и сензорни групи, които имат възможност за измерване на параметри [28]. При първоначалната фаза на анализа, проучих възможностите за измерване на характеристиките на поведение и конкретни параметри на животните, които трябва да бъдат обследвани. От голямо значение е и позиционирането на сензора върху животните [29]. Като заключение се установи, че най – доброто място за закрепяне на сензора е на шията на добитъка. Това е мястото, на което сензорите имат възможност да отчитат промените в активностите и поведението.

Поради условията на живот при пасищното животновъдство, изключихме всички сензори, които налагат инвазивно поставяне. Установи се, че по отношение на достъпността, възможностите, енергийната ефективност и приложимостта на различните сензори, няма готови решения и сензори, които да предоставят цялостната необходима информация. Това определи необходимостта да се изследват възможните комбинации на сензори, които да заемат малко място, да предоставят необходимата информация и да са енергоефективни. На база на предходни наблюдения и натрупан опит от работата по подобни системи, определихме да поставим IoT сензорното устройство на врата на животното.

**В първата версия на разработваното IoT устройство,** предвид необходимостта от получаване на пълна информация включихме следните неинвазивни сензори:

- Сензори за измерване на брой крачки
- Сензори за измерване на акселерацията по три оси
- Сензори за измерване на позиционирането на устройството спрямо земната повърхност
- Сензори за измерване на магнитното поле на земята
- Вибрационни сензори
- Сензори за налягане и натиск

При тестването се установи, че IoT устройството не е енергийно ефективно. Отчитайки начина на работа на сензорите, както и отклоненията в данните се взе решение за премахване на сензора за измерване на брой крачки. След проведени експерименти и направения анализ, се прототипизираха устройства с различен набор от следните релевантни сензори:

- Сензори за измерване на акселерацията

- Сензори за измерване на позиционирането на устройството спрямо земната повърхност
- Сензори за измерване на магнитното поле на земята
- Вибрационни сензори
- Сензори за налягане и натиск

Бяха направени повече от 10 прототипа на IoT устройството с различни по модел и вид сензори, като бяха анализирани получените резултати по няколко параметъра: точност на данните; бързодействие; отчитани параметри; възможност за извършване на сравнителен анализ на базата на всички параметри; стабилност и сензорите и ниска консумация на енергия. Всеки прототип беше анализиран и по отношение на възможностите за постигане на високи нива на консистентност и вярност на информацията, които статистическите и AI алгоритмите могат да обработят и да се изведат максимално близки до истинността заключения.

## 5. Проектиране и реализиране на софтуерни инструменти за събиране на информацията

Следващата стъпка сред проектирането и изграждането на сензорната мрежа, IoT сензорни устройства, работата по реализацията на проекта продължи със създаването и реализацията на моделите и подходите за събиране, нормализиране и обработка на динамично постъпващите данните. На базата на информационния поток, пристигащ от всеки сензор, както и на служебната информация изпращана от всяка точка на сензорната мрежа, се установиха няколко основни изисквания към тези софтуерни инструменти, както следва:

- Записване и обработка на полунормализираната информация пристигаща от сензорите
- Нормализация и повторно записване на информацията, като крайни стойности
- Работа с много сензори, които изпращат информацията за единица време
- Разработване на различни видове модели за нормализацията на информацията спрямо различните прототипи.
- Възможност на процеса да прихваща информацията без да се изпускат транзакции, въпреки честото пристигане на транзакции (понякога в една милисекунда).
- Стабилност и релевантност на данните с високо ниво на вярност и без възможност за грешки

В този етап на предварителна подготовка усилията бяха насочени към реализация с помощта на класически релационни бази данни, като MSSQL, PostgreSQL, MySQL. Изборът на конкретните релационни бази беше насочен, към такива, които са доказали своята стабилност, устойчивост и сравнително лесна поддръжка. След детайлното обследване на реализационните бази данни се достигна до заключение, че е необходим допълнителен буферен „транспортен слой“, базиран на Kafka [30]. Този слой има възможност да поеме и буферира почти неограничено количество ненормализирани данни, които постфактум да се изпратят към релационната база данни за допълнителна обработка и нормализация, чрез комуникационна шина през Backend слоя и микро-услугите. Следователно, процесът следва следната логика:

- IoT мрежата изпраща получените данни от сензорите към разпределителния слой. Този слой им за цел получаване на полунормализираната информация и разпределението на данните към конкретните „topics“ на Kafka. Поради двата основни прототипа на IoT сензорни устройства, информацията се разпределя към различни topics.
- След получаване на първичната информация и запасването ѝ в Kafka, данните посредством микросървиси се разпределя, обработва и първично анализира към релационна база данни.
- При запис на информацията в релационната база данни, тя вече е дефрагментирана на конкретни стойности и позволява заключителната обработка на данните.

Внедряването на Kafka, предостави допълнителна информация за избор на конкретна релационна база данни. Изборът се основава на различни фактори, като: бързодействие; цена; възможности; поддръжка и допълнителни функционалности свързани с IoT. След провеждане на различни тестове и практически експерименти, достигнахме до избора на **PostgreSQL** [31]. PostgreSQL е релационна база данни с отворен код, която предлага мощни инструменти за обработка на сензорни данни. Предимствата, които предоставя са свързани с поддръжката на сложни типове данни (JSON, JSONB, масиви, геопространствени данни и др.), както и с възможностите за обработка на големи обеми от данни чрез инструменти като партициониране на таблици, което е полезно за мащабни сензорни мрежи. Освен това поддържа сигурни механизми за автентикация, криптиране и управление на права, които са важни за защита на сензорните данни. По отношение на точността на данните при интензивен поток на сензорна информация PostgreSQL осигурява ACID съвместимост (консистентност, изолираност и трайност). В допълнение PostgreSQL се интегрира добре с аналитични платформи, като Apache Kafka, TimescaleDB за времеви данни, Grafana за визуализация и др., а за анализа на

получаваните сензорни данни поддържа сложни SQL заявки, агрегации и изчисления. PostgreSQL може да изпълнява паралелни заявки, което ускорява анализите на големи обеми данни, с добавяне на разширението PostGIS, може да обработва географска информация, което е полезно за сензори с GPS. Наред с изброените предимства трябва да имаме предвид и някои проблеми и предизвикателства пред PostgreSQL, като факта, при изключително големи обеми данни (например милиони записи на ден) може да се появят забавяния, а при недостатъчно дисково пространство и оперативна памет PostgreSQL може да стане тежка за системата при обработка на данни в реално време. Освен това PostgreSQL няма вградени ML алгоритми, което ограничава директния анализ и е необходимо да се интегрира към външни инструменти, използващи Python или др.

Устойчивостта на информацията при пристигане и обработка в централните сървъри на системата се базира на първичния разпределителен слой с възможност за приемане и записване на данните от стотици хиляди сензори за единица време. Слойът се грижи за разпределението на информацията по topics в буферната среда Kafka, като след това микросървисите обхождат получената информация, като я анализират, разделят на параметри и я записват в релационната база данни за допълнителен анализ и използване от интелигентните агенти на системата. Подходът осигурява изключително голяма скалируемост на броя сензори, бързодействие, стабилност и минимизирана възможност за загуба на данни. При евентуален проблем в релационната база данни PostgreSQL или проблем с конкретни данни, цялостната система има възможност за проверка и допълнително прехвърляне на първичната информация, съхранявана в Kafka. Този модел на дефрагментацията на данните, записани на различно ниво от обработката си, игнорира възможността за компрометиране на информацията или нейната загуба.

#### **Примери за получена информация от IoT мрежата по слоеве:**

- ✓ **Информация получавана и обработване от сензорите, и предавана чрез сензорния слой**
- Уникален номер на устройството съдържащ в себе си модел и интегрирани сензори: **260BC5D0**
- Дата и час на получаване на информацията: **2024-10-20T09:27:04.761594516Z**
- Не нормализирана информация от сензорите за индивидуалното устройство:

**sp4oQkfaxUEbAFgAAAAAAAAAAAAAAAAAA==**

- ✓ **Разпределение и полу-нормализиране на данните от разпределителния слой към Kafka:**
- Индивидуалния номер се записва в същия приложен вид: **260BC5D0**
- Дата и час на получаване на информацията: **2024-10-20T09:27:04.761594516**
- Полу-нормализираните данни от сензорите на устройството:

**b29e284247dac5411b0058000065000003600801200034056**

✓ **Нормализираната информация по данни разпределена и запаметена в релационната база данни посредством микросървисите:**

- Индивидуалния номер се записва в същия приложен вид: **260BC5D0**
- Дата и час на получаване на информацията: **2024-10-20T09:27:04.761594516**
- Нормализирана информация записана в базата данни подготвена за визуализация и/или за анализ: **1: 42.1249759; 2: 24.23158; 3: 40626; 4: 16936 6: 55879 7: 16837; 8: 27; 9: 88; 10: 0: 11: 0: 12: 42.**

**Броят на параметрите и тяхното значение се определя от моделът на устройството. Системата получава информацията и стойностите на параметрите чрез уникалния му номер.**

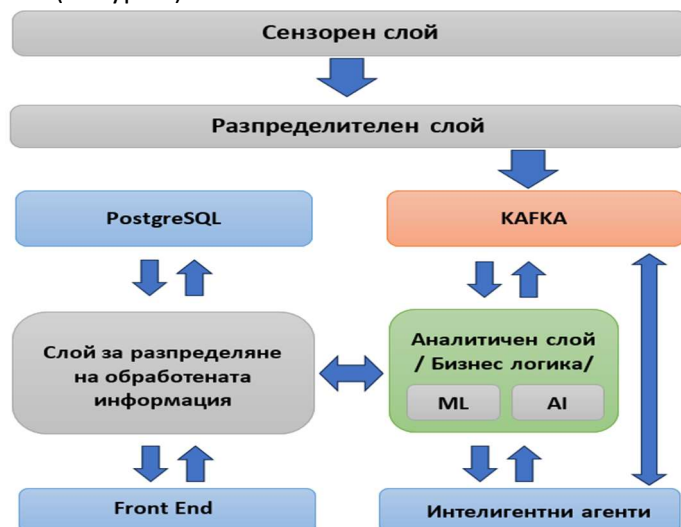
След получаване, записване и първоначален анализ на цялостната информация, както и на метаданните за всеки отделен сензор, данните се записват в релационната база данни и очакват допълнителна обработка и визуализация.

## **6. Проектиране и реализиране на софтуерна инфраструктура за обработка и визуализация на информацията**

До тук изградихме всички слоеве, като започнахме със сензорите и сензорните мрежи, преминахме към преносните среди и интерфейси, както и до частично съхранение и обработване на цялостния информационен поток. Последната стъпка в изграждането на IoT платформата е разработването на софтуерна система включваща имплементация на бизнес процеси, връзка към базата данни, реализиране на потребителски интерфейси, интелигентни агенти и други технологии за анализ, обработка и предоставяне на окончателната информация в подходящ вид на крайния потребител. По време на технологичния процес за изграждането на софтуерната среда се спряхме на използване на Java, поради няколко основни причини: технологична съвместимост с останалите компоненти на ViPS референтната архитектура; отвореността на технологията; изключително големия набор от библиотеки и инструменти улесняващи реализацията на софтуерния продукт; осигуряване на многопоточност и възможности за управление на IoT устройства; възможността за работа на компилирания код на различни

хардуерни платформи и операционни системи; отлична интеграция и интеграционни библиотеки с релационната база данни PostgreSQL.

Диаграмата на технологичните процесите при разработката на софтуерната имплементация може да се проследи в следващата диаграма (Фигура 5).



Фигура 5. Софтуерна архитектура

**Сензорният слой** включва всички крайни сензори, както и събиращите сензорна информация устройства. Всяко едно от тези устройства предава получената информация посредством TCP/IP комуникация към специално проектиран за целта сървър, който управлява събирателните устройства. Поради архитектурата на използваната LoRa WAN мрежа, събирателните устройства поемат и сензорна информация от сензори, които не са част от сензорите на нашето изследване. Т.е. мрежата е отворена за всички устройства използващи LoRa радио среда. От тази гледна точка входящите сензорни данни са замърсени от външни такива, за което се грижи сървърът за управление на събирателните устройства и Разпределителния слой. **Разпределителният слой** има три основни целеви функционалности: приемане на входящата информация от сензорната мрежа и игнориране на непълни транзакции, грешни транзакции или такива, които не са изпратени от сензорите в текущата екосистема; обработка и декриптиране на информацията пристигаща от сензорите, както и подготовката на информацията за последващо действие; разпределяне на информацията по теми “topics” и изпращането ѝ към Kafka. Разпределянето по теми е изключително важен процес за последващите действия и обработване на информацията. След получаване и разпределяне на информацията по теми в Kafka, системата приключва първия и основен цикъл за доставка на данните на сървърно ниво, както и декриптирането и първичното разпределение. **Аналитичният слой** като част от Аналитичното подпространство на ViPS, съдържа в себе си приложената бизнес логика на системата, както и компоненти за автоматизиран анализ на информацията. Детайлният анализ на информацията, както и цялостната бизнес логиката на системата предопределят цялостното функциониране на IoT платформата. Получената информация се дефрагментира, анализира и обработва. Извеждат се заключения, базирани на конкретни данни и сравнени с целия масив от информация, съхранен в системата. Аналитичният слой пряко и косвено комуникира с всички останали слоеве на софтуерно ниво, като предоставя синхронизираща и уточняваща информация на всеки един от тях. Аналитичният слой пряко кореспондира със **Слоя за разпределяне на обработена информация**, който разпределя подадената му информация в релационната база данни, както и предоставя информация на потребителския FrontEnd слой. Този слой е ключов за правилната адресация на актуална и историческа информация към и от релационната база данни и съответно към и от потребителите, използващи системата.

Агентно-ориентираните подходи са особено подходящи за изграждане на CPSS приложения. Основните компоненти на всяка ViPS-адаптирана система са асистентите, реализирани като рационални агенти с BDI – архитектура. Агентът сам по себе си е софтуерен компонент с проактивно, съобразено с контекста интелигентно поведение, който функционира в зависимост от динамиката на околната среда и е в състояние да осигури необходимите функционалности. Услугите са подходящо решение за предоставяне на определена функционалност на системата, но по своята същност те са статични и не достатъчно адаптивни. Поради това във ViPS агентите включват подходящи интерфейси към услугите във вътрешната си архитектура, като така дават възможност на пространството да функционира като интелигентна екосистема, отворена за непрекъснато разширяване с нови услуги. В конкретната ViPS адаптация **интелигентните агенти** проективно предприемат действия, базирани на различни сценарии. Прекият им достъп до Kafka и Аналитичния слой, както и костнения

им достъп до Слой за разпределяне на данни, релационната база данни и FrontEnd-а им позволява взимането на проактивни решения и изпращане на съобщения по цялостната верига на софтуерната система. Подходът за проактивна интеракция с компонентите и потребителите на системата улеснява цялостния анализ на информацията, като осигурява и по – високо ниво на автономност на проекта.

**Потребителският слой** (FrontEnd) има основно предназначение за визуализация и управление от потребителите на напълно нормализираната, потребителски насочена четивна информация и заключения предоставени от системата. Слойът е реализиран изцяло посредством WEB технологии, което позволява работата със системата да се осъществява посредством различни видове устройства като компютри, таблети, смартфони, лаптопи и други. Специално проектирания за целта WEB интерфейс предоставя лесен достъп, както и систематизиране на информацията както за цели групи потребители със сходни профили, така и за отделни конкретни потребители. Интелигентните агенти също имат достъп до потребителския интерфейс, за да могат в реално време, както и исторически да визуализират конкретни събития и да провокират потребителите да обърнат внимание, а при необходимост и да предприемат определени действия.

Структурата на софтуерната система е проектирана с възможност за високо ниво на скалируемост относно: постъпващата информация от сензорната мрежа от неограничен брой сензори; анализ и обработка на съхранената информация; множество конкурентни потребителски сесии.

При разработката на софтуерната имплементация е обърнато внимание и на сигурността на информацията, като са използвани актуални инструменти за повишаването ѝ.

## **7. Изводи от Втора глава**

При технологичното изграждане на няколко последователни прототипа на IoT платформата за интелигентно животновъдство можем да направим следните изводи:

1. Използването на LoRa и GPRS технологиите осигуряват необходимата стабилна преносна среда за създаване на IoT екосистема за отдалечено пасищно отглеждане на животни.
2. Предложената методика за разработката на IoT устройствата осигурява възможност за създаването на два енергоефективни прототипа, които осигуряват стабилно получаване, прървоначална обработка и предаване на динамично постъпващата информация.
3. Предложената софтуерна рамка дава възможност за създаване на софтуерната реализация на IoT средата, включително софтуерните компоненти за събиране, обработка и визуализиране на информацията.

## **ГЛАВА 3. РЕЗУЛТАТИ, АНАЛИЗИ, ДИСКУСИЯ И БЪДЕЩИ ПЛАНОВЕ**

Разработването на цялостният модел и концепция на системата е разпределена в няколко основни фази, според изискванията и анализа на основните информационни и технологични зависимости. В тази глава са описани основните фазите на реализация на проекта от гледната точка на придобиване, обработване и съвместяване на цялостния информационен поток и прилежащите допълнителни данни.

Комплексността на разработката и имплементацията на няколко прототипа на IoT платформата определя необходимостта от екипна работа на различни специалисти – по компютърни науки, мрежи, зооинженери и др. При работата по темата работих като част от екипа за реализация на Националната научна програма за интелигентно селско стопанство, в частта си за интелигентно животновъдство, който беше сформирани към катедра „Животновъдни науки“ Аграрен университет, Пловдив. Представените в тази част резултати, са свързани с моята работа и отговорности по проекта, но част от тях са постигнати при съвместна работа и координация с останалите членове на екипа. Получените резултати са публикувани и представени на научната общност в съавторство с представителите на този екип.

За нуждите на проучваната област и изследване на резултатите, ще разгледаме по-подробно следните направления на развойния процес:

- Изграждането на инфраструктурния модел и системната архитектура на интелигентното пространство за паша на добитъка.
- Изграждането на сензорните групи и сензорни устройства и създаването на локална инфраструктура за събиране на данни.
- разработването на архитектурата на Виртуалния оперативен център, която включва софтуерните и презентационните слоеве от инфраструктурния модел на разработеното интелигентно пространство.

- анализиране на данните от динамичното наблюдение на изследваните единици и откриване на статистически зависимости между реално физическо наблюдение и сензорни данни чрез използване на два внедрени прототипа на сензорни групи.

## 1. Реализация на основните модули и компоненти на платформата

Софтуерната инфраструктура на системата е базирана на многопластов модел на внедряване и интеграция между отделните слоеве. Поради комплексността на проекта търсихме в голяма степен оптимална инфраструктура и многослойно-диференцирано сегментиране на цялостната система:

- Сензори и IoT сензорни устройства.
- Сензорна IoT мрежа.
- Инфраструктурна свързаност между сензорната мрежа и функционалните сървъри.
- Сървърен слой за първично съхранение на информация.
- Сървърен слой за приложни бази данни (включително релационни и нерелационни бази данни).
- Слой за обработка и анализ на данни (включително системи и методи за анализ).
- Приложен функционален слой за систематизиране на данните.
- Клиентски слой за визуализация на информацията в систематизиран вид.

**Сензори и IoT сензорни устройства.** На най-ниското ниво в системната архитектура са сензорите и IoT сензорните устройства. Всяко животно има индивидуално IoT устройство с набор от различни сензори. Сензорното устройство се прикрепя към животното посредством специален нашийник. Тестовите групи от сензори, които моделират информацията за опитните цели биват:

- сензор за ускорение (точност на измерване  $\pm 0.1 \text{ g}$ )
- сензор за ъглово отклонение (точност на измерване  $\pm 0.5^\circ$ )
- специален двуизмерен сензор за активност (сензори Fullamp1 и Fullamp2)
- сензор за локализация (точност на измерване  $\pm 10$  метра).

На базата на сензор за ъглово отклонение са разработени 6 виртуални сегментационни вериги на разпределение на информацията. Всяка разполага с голям брой на измервания на физическия сензор в определен диапазон за времеви диапазон (2 минути). Диапазоните на ъгловото отклонение са:

- $-90^\circ$  до  $-70^\circ$  (сензор Full9070);
- $-69^\circ$  до  $-50^\circ$  (сензор Full7050);
- $-49^\circ$  до  $-30^\circ$  (сензор Full5030);
- $-29^\circ$  до  $-10^\circ$  (сензор Full3010);
- $-9^\circ$  до  $10^\circ$  (сензор Full1010);
- $11^\circ$  до  $90^\circ$  (сензор Full1090);

Сензорът за ъглово отклонение генерира резултат от измерването на всяка половин секунда.

В изследването са включени два варианта на IoT сензорни устройства, които покриват в най-голяма степен поставените изисквания:

**Прототип 1 (Pr1)** - Pr1 включва 8 вида сензори за активност и GPS. Използвайки GPS данните от две последователни транзакции, се изчислява изминатото разстояние по права линия.

**Прототип 2 (Pr2)** - Pr2 е значително опростен и включва само три сензора за активност. Данните от двете сензорни системи се получават на интервал от 2 минути.

Концепцията на системата, както и прилежащите модули (хардуерни и софтуерни) са проектирани по начин, който позволява с минимални усилия да се добавят, променят или премахват мета сензори и сензорни групи, които допринасят за гъвкавостта на изследването и покриват изискванията на предметната област.



**Фигура 6.** Два прототипа на създадените IoT устройства

Използването на двата типа устройства/прототипи (Фигура 6.), както и синтезът на техните параметри, притежава потенциала да генерира пълна картина на поведенческите характеристики на отделните животни, стадните навици на групата наблюдавани животни, както и колективното стадно поведение.

Следващата важна стъпка в оптимизирането на IoT устройството е свеждането на част от „интелигентността“ до най-ниското ниво на сензорите. Тестовите ни показаха, че за да получим възможно най-много данни и да

защитим коректността на получената информация, е необходимо да събираме повече от 20 параметъра всяка секунда (например: GPS данни, акселерометър, жирокоп, магнитометър, шумови данни, нормализирани данни за позицията, данни от предавателя, хардуерни параметри на детектора и други.) Експериментално и аналитично открихме, че този подход предоставя максимално количество точна информация, но критичната точка е голямото количество данни, които трябва да бъдат изпратени към проектираната радио инфраструктура LoRa. Количеството данни от своя страна генерира редица проблеми по отношение на енергийната оптимизация, нормативните европейски и световни регулации, които НЕ позволяват превишаване на заетостта на радиоканала и много други. Въз основа на нуждите от измерванията и възникналите проблеми стигнахме до извода, че е необходимо IoT устройството да събира и частично да обработва първичната информация. За да се минимизира информационният поток, частичната обработка на информацията, извеждането на междинни заключения и вземането на определени решения се реализират в самото IoT устройство. Обработената полунормализирана информация се препраща към горните слоеве в инфраструктурния модел на платформата.

**Трансферна IoT сензорна инфраструктура.** Успоредно с разработката на IoT сензорните устройства на кравите извършихме и анализи и изследвания в областта на транспортната и сървърната среда на цялостния проект. Тъй като пасищното отглеждане на животните изисква получаване на данни и от статичната сензорна мрежа на пасищата, създадохме формален модел на получената IoT инфраструктура [32]. Този модел представя възможностите за припокриване на двете сензорни мрежи - статичните сензорни групи на пасището и динамичните сензорни групи на кравите в това пасище. Да разгледаме двете множества:

- $SGL = \{sgl_1, \dots, sgl_n\}$  като набор от IoT сензорни групи, включени в статичната сензорна мрежа на пасището;
- $SC = \{sc_1, \dots, sc_m\}$  като набор от динамичните IoT сензорни устройства, поставени върху кравите от стадото;
- Освен това нека разгледаме и множествата:
- $Date = \{d_1, \dots, d_k\}$  е набор от календарни дати, на които се извършват измерванията, а
- $Time = \{t_1, \dots, t_s\}$  е множеството моменти от време, в които се извършват тези измервания;
- $Location = \{l_1, \dots, l_n\}$  е набор от места, където са монтирани SGL сензорните групи.

Предполагаме, че всеки елемент от двете основни множества SGL и SC може да включва в IoT устройството различни типове сензори (например двата прототипа на сензори при кравите), т.е. елементите на тези множества ще бъдат представени като списъци, съдържащи стойностите на съответното сензорно измерване. Всеки сензор в съответния IoT има постоянна, предварително фиксирана позиция в списъка. Сензорите, които не участват в съответната група, получават стойност none в списъка. Тогава елементите на множествата SGL и SC можем да представим във вида:

- $sgl_i = (v_1, v_2, v_3, \dots, v_p)$ , където  $p$  е броят на всички видове сензори в пасището.
- $sc_i = (vc_1, vc_2, \dots, vc_k)$ , където  $k$  е броят на различните типове сензори в IoT устройствата на кравите.

Тогава можем да дефинираме комбинираната виртуална IoT сензорна мрежа като:

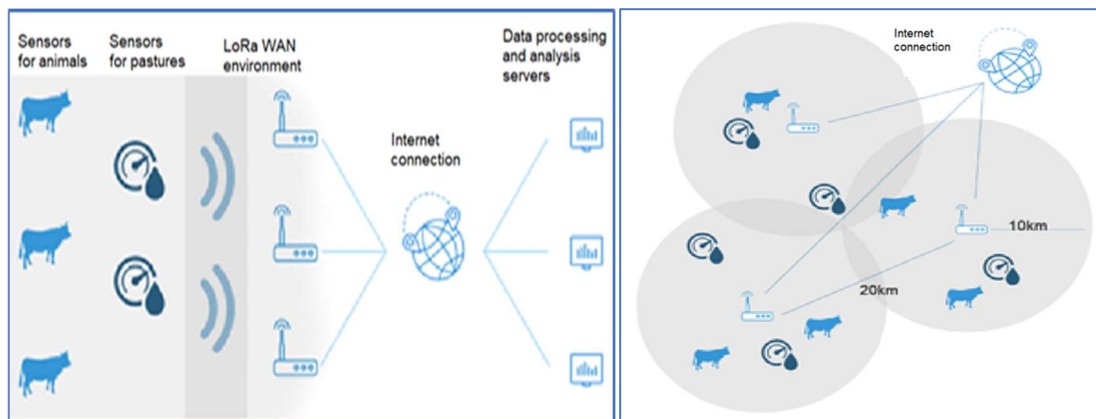
$$VSNET \subseteq (SGL \cup SC) \times Location \times Date \times Time$$

Виртуалната мрежа ще се поддържа във виртуалното пространство на всички инфраструктурни нива – в сървъра, в Центъра за данни и в облака. Във физическото пространство двете сензорни мрежи съществуват независимо една от друга. Комуникационната мрежа на пасището се използва за предаване на данни към следващите компоненти на платформата. В разработвания инфраструктурен модел се разглежда поддържащата статична сензорна IoT мрежа на пасището и динамичната стадна IoT сензорна мрежа, която се създава, когато стадото влезе в пасището (Фиг. 7). Основната технология за предаване, е протокол за широкообхватна мрежа с ниска мощност LoRa, чрез която успяхме да осигурим покритие върху почти 10 квадрата километра с една централна станция, както и линейно увеличаване на обхвата без ограничения чрез добавяне на допълнителни станции (Фиг. 8). На второ място използвахме общата пакетна радио услуга (GPSR) комуникация. За нуждите на разработваната система бяха избрани отворени честоти за безплатно използване, както следва: 868Mhz за Европа и 433 за други страни с различни регулации. Честотният диапазон отговаря на местните държавни разпоредби за радиоразпръскване. Честотите, на която използваме втората технология GPRS са 850/900/1800/1900MHz.

Използването на унифицирана преносна среда за двата типа сензори позволява оптимизирано предаване и обработка на информация. Според конкретните настройки на околната среда предложената инфраструктура може да постигне параметри на предаване от над 10 km от централната станция и над две години автономна работа на сензорите за животни и над шест години автономна работа на сензорите за статични пасища.

**Виртуален оперативен център. Моделиране и обработка на информация.** Основният модул в системата е Виртуалният оперативен център (VOC). Той разширява и допълва базовата ViPS архитектура с компоненти,

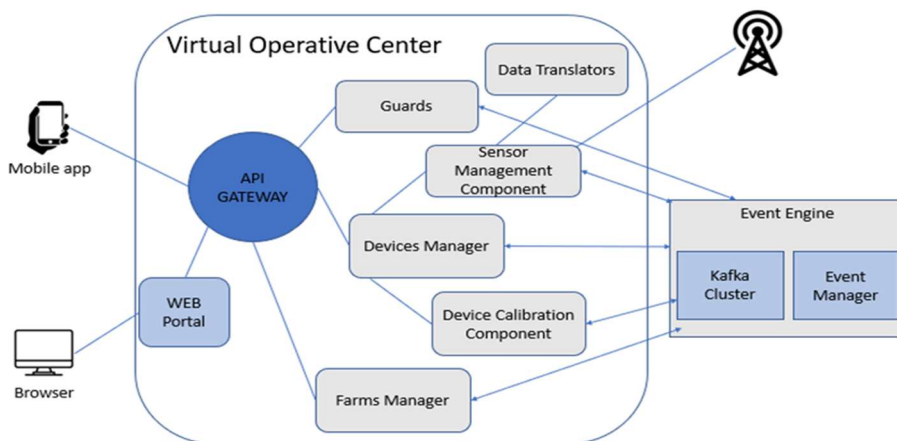
зависими от изследваната предметна област и включва софтуерните и презентационните слоеве от инфраструктурния модел [32].



**Фигура 7.** Изграждане на IoT инфраструктурата **Фигура 8.** Широкообхватен инфраструктурен модел

Първият прототип на VOC включва следните пет основни компонента: компонент за управление на сензори; компонент за управление на устройства; компонент за управление на ферма; компонент за калибриране на устройството и преобразователи на данни. **Компонентът за управление на сензори** осигурява функционалностите за добавяне, промяна и премахване на информация от сензори. Това включва пълна информация за данните, които сензорът предоставя, както и мета информация, необходима за неговата идентификация. **Компонентът за управление на устройства** предоставя функционалност за добавяне, модифициране и премахване на виртуални IoT устройства (сензорни групи). Виртуалните устройства представят във виртуалния свят информацията за реалните физически устройства и включват пълна информация за сензорите, които ги съставят, без ограничение на техния вид и брой. **Компонент за управление на ферма** предоставя функционалности за управление на ферма с техните пасищни животни и устройства, работещи на нейната територия. Този компонент осигурява: добавяне, промяна и премахване на ферма; определяне местоположението на фермата и територията, на която е разположена; добавяне, смяна и извеждане на говеда във фермата; активиране/деактивиране на устройство за животно или конкретно място в рамките на пасището. **Компонентът за калибриране на устройството** има за цел да промени настройките на устройството чрез проследяване на поведението на животните. **Преобразувателят на данни** преобразува получаваните полунормализирани данни в подходяща за съхранение и обработка вид.

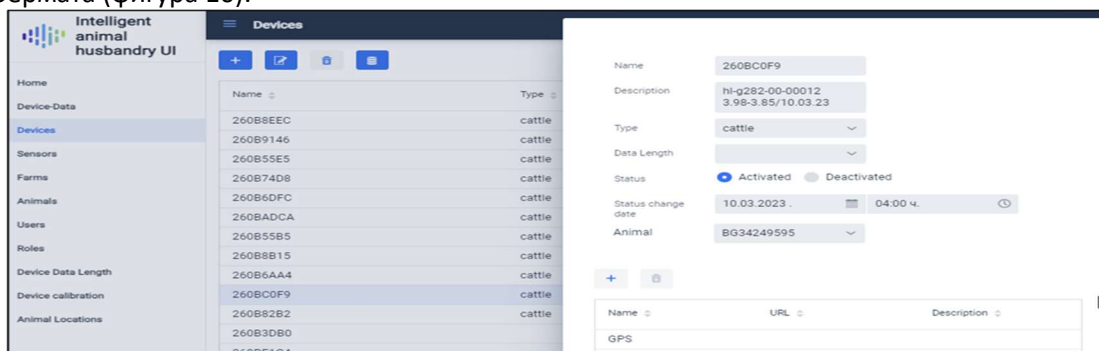
След период на тестване и анализ, архитектурата на VOC беше допълнена с още няколко компонента. Архитектурата на **вторият прототип на VOC** [33], [35] е представена на следващата фигура 9.



**Фигура 9.** Архитектура на актуалния прототип на Виртуалния оперативен център

Компонентът за управление на фермата **Farm Manager** предоставя възможност за предоставяне на различни видове услуги свързани с животните и управлението на фермата. Управлението на животните включва услуги за здравето на животните, родословие, медицински досиета и др. Услугите за управление на фермата включват управление на пасища и др. **Диспечерът на устройства** предоставя набор от функционалности за деклариране на различни конфигурации на устройства със специфичен набор от сензори. Регистрацията на устройствата изисква релация с дадена конфигурация, предварително дефинирана в предоставяните услуги. Компонентът

предоставя и услуги за активиране на устройство, което изисква връзка с конкретно животно или координати на пасище във фермата (фигура 10).



Фигура 5. Диспечер на устройствата във VOC

Компонентът за управление на сензори е предназначен за регистриране и управление на информация от сензорите, а компонентът за калибриране на устройството служи за калибриране на резултатите. За да може да се наблюдава поведението на животните, е необходимо данните, събрани от устройствата, да се категоризират въз основа на даден шаблон. За всеки тип устройство е необходимо да се разработи определен шаблон за калибрация. Процесът на създаване, съхраняване и прилагане на шаблоните се управлява от компонента за калибриране на устройството. Калибрирането включва наблюдение на поведението на животните както чрез устройствата, така и чрез директно наблюдение от специалисти в областта на животновъдството (зооинженери). В процеса на получаване на данни от устройствата, данните се свързват с резултата от директното наблюдение. В последствие, чрез прилагане на статистически анализ на цялостната информация се създава конкретния шаблон за нуждите на бъдещи оптимизации и анализи. Компонентът **Data Translators** отговаря за нормализирането на полу нормализираните данни предоставени от устройствата, компонентът **Guard** предоставя набор от услуги, свързани с безопасността на животинските единици, като например: напускане на периметъра на пасището, неподвижност за определен период, отделяне от стадото и др.

Само регистрирани потребители имат достъп до приложението, а различните функционалности са достъпни само за потребители с необходимите права:

- Потребителите с ролята "Администратор на сензора" имат достъп до функциите за управление на сензора.
- Потребителите с ролята на администратор на устройството имат достъп до екраните за управление на устройството.
- Потребителите с ролята "администратор на фермата" имат достъп до екраните за управление на информацията за фермата и животните.
- Потребителите, маркирани като мениджъри на ферма и тези с ролята "администратор на ферма" имат достъп до екраните с данни на устройството.

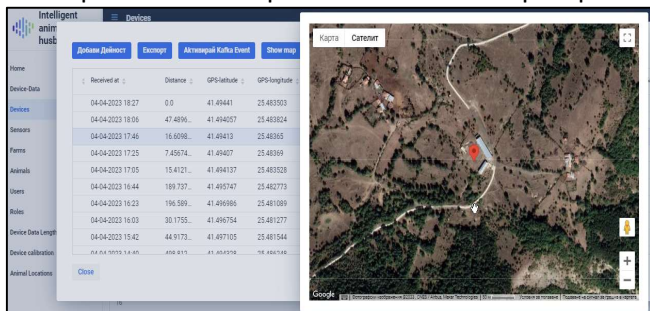
Администраторът на сензор има пълен достъп до функциите за управление на сензора. Той получава визуализация на наличните сензори с възможност за филтриране и сортиране. Над таблицата са разположени бутоните за добавяне, промяна и изтриване на сензор. Бутоните за промяна и изтриване се активират при избор или запис в таблицата. Когато изберете бутона „Добавяне“ или „Промяна“, се отваря диалогов прозорец с подробна информация за сензора. Налични са три полета: име - идентификатор на сензора; описание - описание на сензора; URL - връзка към страница с допълнителна информация за сензора.

Всеки сензор предоставя данни от своята работа под някаква форма. Поради тази причина в диалога има таблица, в която (с бутоните над нея) може да се добавя информация за данните от сензора. Редът на записите в таблицата с данни от сензора е съществен. Потребителите с профил на *администратор на устройство* имат достъп до функциите за управление на устройството. Екранът се състои от таблица с налични устройства и възможности за добавяне на ново устройство, промяна на устройство и изтриване на устройства. Когато едно IoT сензорно устройство е активирано, системата получава информация за неговото местоположение, което се визуализира на картата на пасището. В процеса на разработване и тестване на прототипите се фокусирахме върху **три вида пасища** за екологично чисто отглеждане на крави:

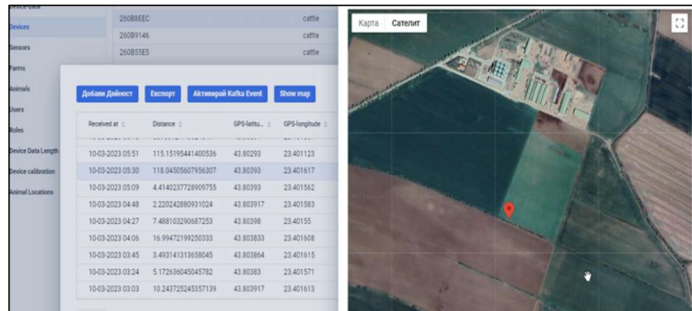
- Кравеферма и пасище към Учебно-опитно стопанство на Аграрен университет-Пловдив (АУ).
- Планинска ферма и пасище с труднодостъпен терен в близост до гр. Момчилград (в района на югоизточната част на Родопите).

- Ферма и пасище по поречието на река Дунав със специфични особености – гранична зона без или с недостатъчна интернет и мобилна свързаност; равен терен със стръмни брегове към реката.

В момента се провеждат проучвания, свързани със стабилността на връзката на сензорните устройства с Виртуалния оперативен център (VOC). В тази насока паралелно се провеждат опити в другите две ферми, с месодайни и местни породи крави. Едната ферма е разположена в планински полупресечен терен (Фигура 11), а другата е по поречието на река Дунав – със стръмни брегове на реката (Фигура 12). Животните и в двете ферми през по-голямата част от годината са на пасища, отдалечени от фермите, поради което е невъзможно да се използва WiFi. Също така по поречието на река Дунав, поради стръмните брегове и близката граница с Румъния, няма покритие на българските мобилни оператори.



**Фигура 11.** VOC обработка на информация за животните във високопланинско пасище



**Фигура 6.** VOC обработка на информация за животните в района на река Дунав

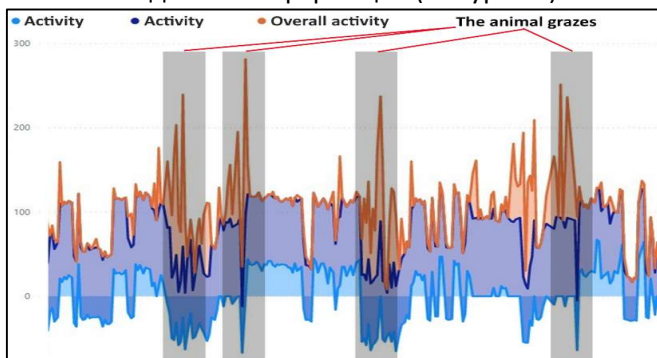
Данните преминават през няколко нива на изчистване и трансформиране, преди да бъдат обработвани във VOC. До тях имат достъп всички заинтересовани потребители на различно ниво, според техните права. Например, *сензорната таблица* визуализира сензорите, които са включени в IoT устройството (Фиг.13).

| Device Identifier | Channel Rssi | Row Data               | Gps Latitude | Gps Longitude | Device Temperature | Received At            | Ax  |
|-------------------|--------------|------------------------|--------------|---------------|--------------------|------------------------|-----|
| 2608EC86          | -33          | ff9a2842e40cc641480... | 42.151363    | 24.756294     | 27.529999          | 2021-08-04T11:55:59... | 72  |
| 2608EC86          | -35          | ff9a2842e30cc641c00... | 42.151363    | 24.756292     | 27.529999          | 2021-08-03T11:41:23... | 448 |
| 2608EC86          | -32          | ff9a2842e20cc641200... | 42.151363    | 24.75629      | 26.529999          | 2021-07-28T06:52:41... | 288 |
| 2608EC86          | -31          | ff9a2842d60cc641b00... | 42.151363    | 24.756268     | 28.529999          | 2021-08-05T14:53:32... | 176 |

**Фигура 7.** Управление на данните за сензорите в едно IoT устройство

Когато се активира едно IoT устройство, то започва да изпраща полунормализирани данни, които се обработват допълнително и на екрана се визуализират данни за IoT устройството с конкретна конфигурация. Потребителите с роля „Администратор на ферми“ получават данните от всички устройства, докато потребителите, маркирани като мениджъри/собственици на ферма, виждат само данни от устройствата, активирани в тяхната ферма.

**Втората версия на VOC** включва актуализираната версия на представянето на данните. Внедрена е и първата версия на компонента за калибриране (Фиг.14). Компонентът осигурява два подхода за представяне на данните от устройството и текущата активност на животното. При първия подход потребителят ръчно избира запис и добавя необходимата информация (Фигура 15).



**Фигура 14.** Данни от компонента за калибриране активността на кравите

|                                                                                                |                          |                          |                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| It walks                                                                                       | <input type="checkbox"/> | It runs away             | <input type="checkbox"/> |
| It stands right                                                                                | <input type="checkbox"/> | It lies                  | <input type="checkbox"/> |
| It sleeps                                                                                      | <input type="checkbox"/> | It drinks water          | <input type="checkbox"/> |
| It urinates                                                                                    | <input type="checkbox"/> | It defecates             | <input type="checkbox"/> |
| The animal is grazing                                                                          | <input type="checkbox"/> | The animal is ruminating | <input type="checkbox"/> |
| Stood to be mounted                                                                            | <input type="checkbox"/> | The animal is mounting   | <input type="checkbox"/> |
| Notes                                                                                          |                          |                          |                          |
| <input type="text"/> <input type="button" value="Save"/> <input type="button" value="Cancel"/> |                          |                          |                          |

**Фигура 15.** Потребителска гледна точка към

Вторият подход е проактивен, базиран на Kafka Streams. Компонентът за калибриране осигурява слушател и когато се активира, компонентът автоматично ще покаже на потребителя изгледа на активността на животните. Предоставените данни се свързват с данните на устройството и могат да бъдат анализирани в следващата стъпка от калибрирането. Резултатът от процеса на калибриране са модели на представяне на данни от сензори за всяка животинска дейност. Тези модели ще се използват за обработване на данните от IoT устройството и потребителят (фермера) може да получава информация за моментната активност на животното. В следващата версия на компонента Калибриране ще бъде внедрен подход за автоматизация на създаването на тези модели.

## 2. Анализ на първичните резултати и тестване на данните

В **Прототип 1** се използват няколко основни типа сензори. Геолокализацията използва GPS сензор, който позиционира животното и измерва изминатите разстояния за единица време, както и извършва различни видове поведенчески анализи спрямо зоните за паша. Също така използваме сензори за позициониране на врата на животното чрез въздействие върху 3 пространствени равнини. Данните ни позволяват да измерим в детайли цялостното поведение на животното, чрез определяне на позицията на главата. В комбинация с другите данни целим да създадем цялостния модел на поведение. Третата група сензори са комбинация от няколко двуизмерни сензори за активност. Те позволяват попълването на целия набор от данни и цифровото изразяване на поведението и дейността на животното. Наборът от трите основни групи сензори се анализира и комбинира първично на ниво сензор, което в последствие се обработва в детайли в софтуерния слой. Данните от сензора се събират на интервали от 2 минути. Беше извършено и физическо наблюдение (от страна на зооинженери), за да се калибрира поведението на животните спрямо пристигащите данните от сензорите. При всяка транзакция на данни от сензорите, посредством съответна функционалност на системата, се генерира заявка към наблюдателя за въвеждане на конкретна дейност в момента на получаване на данните. Системата позволява да се избират няколко дейности едновременно от страна на наблюдателя. Връзката на реалните дейности на животните със съответните сензорни данни служи за проверка и верификация на разработения модел. Физически наблюдаваните и докладвани реакции на животните за отделните типове устройства са както следва:

- за Прототип 1 – 265 наблюдения
- за Прототип 2 – 314 наблюдения.

Прототипния софтуер служещ за калибриране и управление на сензорите притежава опции за дейности като: ходене; преживяне; сън; паша; тичане; лежане; изправяне и др. Наблюдателят е подканен от компонента за калибриране да избере една или повече от дейностите, които животното е извършило през предходния период от две минути. Поради краткия период на физическо наблюдение на поведението за някои от дейностите не бяха събрани достатъчно данни, които да бъдат включени в статистическия анализ.

С цел анализиране връзката между данните от устройството и реалните поведенчески реакции в даден момент се използва **многовариантен** линейен модел (1), чрез който отчитаме влиянието на активността, като фактор върху данните, получени от всеки един от сензорите. Статистическият модел се използва отделно за анализ на данните на всеки от прототипите.

$$Y_{ij} = \mu + D_i + e_{ij}, (1)$$

Където:  $Y_{ij}$  е вектор за наблюдение (дейност, която животното извършва);  $\mu$  е обща средна константа;  $D_i$  е фиксираният ефект от  $i$ -тото действие (**Прототип 1**: ходене, бягане, паша, паша и търсене на пасищна трева, паша на листа от дървесна растителност; **Прототип 2**- борба, ходене, възкачване, лежане, лежане и преживяване, паша, изправяне и изправяне и преживяване);  $e_{ij}$  е остатъчната дисперсия.

**Таблица 1.** Статистическа обработка данни от двата прототипа

| Прототипни устройства | Сензори         | F    | Sig.  |
|-----------------------|-----------------|------|-------|
| Прототип 1            | Fullamp2, rad/T | 2.01 | 0.098 |
|                       | Fullamp1, rad/T | 52.3 | 0.000 |
|                       | Full9070, N/T   | 2.19 | 0.075 |
|                       | Full7050, N/T   | 5.50 | 0.000 |
|                       | Full5030, N/T   | 5.15 | 0.001 |
|                       | Full3010, N/T   | 5.03 | 0.001 |
|                       | Full1010, N/T   | 12.4 | 0.000 |
|                       | Full1090, N/T   | 10.1 | 0.000 |
|                       | Distance, m     | 75.4 | 0.000 |
| Прототип 2            | Activity, Hz/T  | 11.3 | 0.000 |

|     |      |       |
|-----|------|-------|
| axX | 43.1 | 0.000 |
| axY | 20.9 | 0.000 |

От таблица 1 става ясно, че дейността, извършена в момента на получаване на данните от сензорите, значително влияе върху повечето от стойностите на устройството. Незначително влияние са отчели само два от дванадесетте използвани сензора - Fullamp2 (сензор за активност) и Full9070 (акселерометър), намиращи се в Прототип 1, за които имаме значително по-малко данни. Тези резултати ни дават основание да приемем, че с натрупването на достатъчно голям масив от данни, събрани паралелно от сензорите и визуално отчитане на активността на животното, можем успешно да използваме многофакторния дисперсионен анализ, като статистически инструмент за проверка на адекватността на сензорите, включени в устройствата за проследяване на поведението на животните. Периодът от 2 минути, в който се получават данните от сензорите, е напълно достатъчен за извършване на калибриране на системата.

Таблица 2 представя резултатите от изследването, проведено върху прототип 1. Тя показва, че за всяка дейност средните стойности на сензорните данни се различават значително. От друга страна, може да се наблюдава уникална комбинация от индикатори за различните дейности. Например дейностите „Паша“ и „Паша и движение в търсене на храна“ изглеждат близки, но се забелязва, че разстоянието, отчетено на базата на GPS сензора, се различава значително – съответно  $27,01 \pm 2,662$  m и  $35,62 \pm 6,137$  m ( $P < 0,001$ ). По-съществени разлики в тези две дейности се наблюдават и между показателите на Fullamp1.

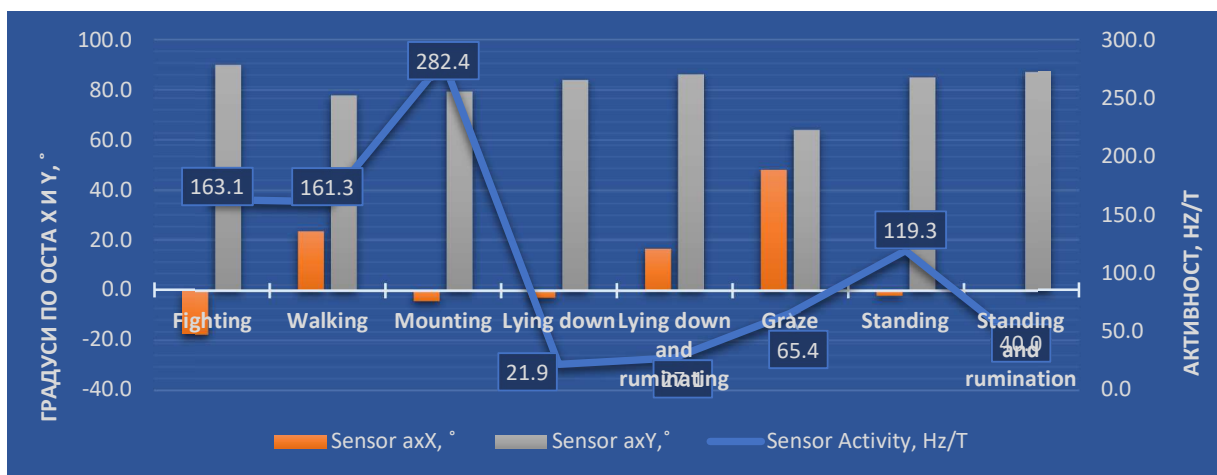
| Сензор                        | Вървене |      | Бягане |      | Паша  |       | Паша и търсене на пасищна трева |       | Паша на листа от дървесна растителност |      |
|-------------------------------|---------|------|--------|------|-------|-------|---------------------------------|-------|----------------------------------------|------|
| Sensor                        | Mean    | ± SE | Mean   | ± SE | Mean  | ± SE  | Mean                            | ± SE  | Mean                                   | SE   |
| Fullamp2 <sup>1</sup> , rad/T | 232.0   | 4.66 | 158    | 99.9 | 238.8 | 10.8  | 185.2                           | 5.0   | 132.5                                  | 49.9 |
| Fullamp1 <sup>1</sup> , rad/T | 56.0    | 9.27 | 296    | 20.7 | 18.6  | 2.25  | 26.9                            | 5.18  | 70.3                                   | 10.4 |
| Full9070 <sup>2</sup> , N/T   | 8.00    | 3.21 | 2.00   | 7.17 | 12.8  | 0.78  | 11.2                            | 1.79  | 4.75                                   | 3.59 |
| Full7050 <sup>2</sup> , N/T   | 37.8    | 8.77 | 3.00   | 19.6 | 52.8  | 2.13  | 56.7                            | 4.90  | 17.0                                   | 9.80 |
| Full5030 <sup>2</sup> , N/T   | 27.4    | 5.39 | 6.00   | 12.0 | 37.6  | 1.31  | 34.6                            | 3.01  | 16.7                                   | 6.02 |
| Full3010 <sup>2</sup> , N/T   | 25.0    | 4.06 | 39.0   | 9.08 | 11.6  | 0.98  | 10.2                            | 2.27  | 14.7                                   | 4.54 |
| Full1010 <sup>2</sup> , N/T   | 12.4    | 2.94 | 35.0   | 6.57 | 5.14  | 0.712 | 7.37                            | 1.64  | 22.2                                   | 3.28 |
| Full1090 <sup>2</sup> , N/T   | 12.2    | 7.40 | 41.0   | 16.5 | 5.75  | 1.79  | 5.62                            | 4.14  | 56.5                                   | 8.27 |
| Distance, m                   | 57.4    | 11.0 | 452.2  | 24.5 | 27.0  | 2.66  | 35.6                            | 6.137 | 38.7                                   | 12.3 |

**Таблица 2.** Осреднени стойности на данните, получени от прототип 1.

(<sup>1</sup> Брой измервания в определен ъглов обхват/период от време 2 минути; <sup>2</sup> радиана/времеви период 2 мин  
SE = стандартна грешка)

**Прототип 2** включва три сензора: сензор за измерване на активността; сензор за ускорение и сензор за ъглово отклонение по осите X и Y. Въпреки малкия брой на сензорите, спрямо високата им продуктивност и съпоставяне на данните, е ясно, че предоставят достатъчно надеждна информация за отчетлива деференциация на различни типове дейности. С този прототип успяхме да съберем по-голям обем от данни за повече видове дейности, като всички дейности се различават значително и са статистически значими ( $P < 0,001$ ). Базирайки се на Umstätter и др. (2008) [35] **Error! Reference source not found.** приемаме, че акселерометрите могат надеждно да разграничат легнали и изправени позиции на животните. Това е от решаващо значение за наблюдение на кравата, тъй като прекомерното време за лежане може да показва здравословни проблеми (Фиг. 16).

При два от използваните сензори, Fullamp2 и Full9070, има голям импеданс и голяма статистическа грешка, поради недостатъчно количество данни, събрани от физически наблюдения на поведението. В тази връзка е необходимо да се проведат по-голям брой физически наблюдения, за да се обхванат повече дейности и да се определят статистически интервали на вариация за всеки сензор.



**Фигура 16.** Влияние на дейностите при работата на сензорите (Прототип2)

Най-големите разлики за всички дейности се наблюдават по отношение на сензорните групи за активност. Отклонението по X е в отрицателната скала на стойности, най-значително при „заскачане“ и „пререкания между животните“. При ходене, лежане и преживяване, както и при паша, отклонението по X е с положителни стойности. За всички останали дейности стойностите са близки до нула. Тъй като устройствата за Прототип 2 са снабдени с тежест, поставена в долния край на нашийника, жироскопът почти не променя позицията си по Y, съответно Y измерванията за всички дейности имат много близки стойности – от  $64,2 \pm 1,45$  до  $90,2 \pm 4,70$  ( $P < 0,001$ ). Подобно на Прототип 1, всяка дейност се характеризира с уникална комбинация от средни стойности от данните от всички сензори. С последващо софтуерно определяне и обработка на границите на вариация на всеки показател за съответната дейност и конкретната комбинация от всички тях, би позволило успешно да диференцираме и разпознаем съответната дейност. Това ще позволи данните от разработената система да идват под формата на дейности, като време, прекарано на паша, почивка, разходка и др. всички характеристики на поведението на животното, по които да се прецени неговото благосъстояние и косвено липсата или наличието на достатъчно пасищна трева.

#### Корелации между различни активности и сензори:

- Пасенето (Pr1) корелира силно с наклона на главата (Full3010, Full1010, Full7050).
- Ходене и бягане (Pr1) са пряко зависими от GPS и Fullamp1.
- Заскачане и борба (Pr2) – най-отчетливи чрез axX и Activity Hz/T.
- Лежане и преживяване (Pr2) – ниски стойности на Activity Hz/T, стабилни axY.

Следователно:

- Прототип 1 е по-прецизен за разпознаване на пасене и статични активности, но някои сензори не дават достатъчно данни (Full9070, Fullamp2).
- Прототип 2 успешно диференцира динамични активности като борба и скачане, но е по-малко чувствителен към различни позиции на главата.
- Най-добър модел би бил комбинация от сензорите на Pr1 и Pr2.

### 3. Бъдещи планове и насоки за изследвания по темата

Бъдещите планове за разработката на IoT платформата, като конкретна адаптация на референтната ViPS архитектура включват разработка на персонални асистенти за различните участници – фермери, зооинженери, ветеринарни специалисти, администратори и т.н. Сензорите предават данни към централните устройства за приемане на данни, а интелигентните слоеве обработват и анализират информацията въз основа на местоположението на добитъка спрямо местоположението на регулираните пасища, на които животните са били хранени. Центърът за данни трябва да осигури интелигентното функциониране на системата. В този компонент се извърши виртуална "комбинация" на двата вида сензорни мрежи, като данните могат да се използват за разработване на два вида модели: пасищен модел, който представя текущото състояние на самото пасище като развитие на тревостоя и физиологичен модел, който представя физиологичното състояние на животните, които са пасли на това пасище.

Обработваните данни могат да бъдат основа за разработване на икономически модели, които да позволят изготвяне на анализи и прогнози от типа „Как зависи качеството и обемът на продукцията (месо, мляко, сирене и др.) от отчетените параметри на пасищата и физиологичните характеристики на животните?“ В бъдеще може да се обмисли изграждането на блокова верига „Умни пасища (ливади)“.

Многофакторният дисперсионен анализ може успешно да се прилага като статистически инструмент за проверка на адекватността на сензорите, включени в устройствата за проследяване на поведението на животните. В допълнение, той може да се използва за определяне на референтни стойности и комбинации от сензорни данни, с които да се отчетат моделите на активност-поведение на всяко животно. Резултатите ни дават основание да приемем, че с натрупването на достатъчно голям масив от данни, събрани паралелно от сензорите и визуално отчитане на активността на животното, можем успешно да използваме многофакторния анализ като статистически инструмент за проверка на адекватността на сензорите, включени в устройствата за проследяване на поведението на животните. В бъдещ план с последващо софтуерно определяне на границите на вариация на всеки показател за съответната дейност и конкретната комбинация от всички тях, би ни позволило успешно да разграничим и разпознаем съответната дейност. Това ще позволи данните от разработената система да идват под формата на дейности, като време, прекарано на паша, почивка, разходка и др. всички характеристики на поведението на животното, по които да се прецени неговото благосъстояние и косвено липсата или наличието на достатъчно пасищна трева.

Друга насока за бъдещи изследвания е използването на AI подходи и алгоритми за машинно обучение. Във VOC могат да бъдат разположени интелигентни компоненти, използващи ML алгоритми, които освен за предвиждане на поведението на животните, могат да помагат за определяне на състоянието и качествата на тревостоя. Освен това те могат да решават задачи като: идентифициране на отровни и вредни за животните растения, разпознаване на редки и защитени растения и др. Освен това във VOC могат да се решават различни оптимизационни задачи, като определяне на натоварването на пасищата и оптималния брой животни, които могат да се хранят за един вегетационен период за едно пасище в зависимост от текущото му състояние. Това дава основание да се дефинира като цел за бъдещо развитие на системата създаването на специализиран модул за анализ и оптимизация, използващ DRL и други AI алгоритми като част от Аналитичното подпространство на референтната ViPS архитектура.

#### **4. Изводи от трета глава**

1. Създадената сензорна мрежа и IoT устройства покриват изискванията на поставената задача за осигуряване на устойчиво получаване, предварителна подготовка и предаване на полунормализирана информация, както и за постигане на енергоефективност.

2. Последната версия на Виртуалния оперативен център осигурява удобна среда за обработка, анализ и визуализиране на информацията за поведението и активностите на животните. Необходимо е продължаване на изследванията за разработка на персонални асистенти за осигуряване на ефективна комуникация на фермерите със системата.

3. Статистическата обработка на информацията осигурява добра основа за продължаване на изследванията, насочени към създаването на устойчиви поведенчески модели на крави с пасищно отглеждане. Необходимо е да се продължи работата по приложението на AI алгоритми за прогнозиране и оптимизиране на стадното поведение на животните.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В дисертацията е представено изследване за създаване на концепция, моделиране и прототипиране на IoT среда за интелигентно животновъдство. Разработена е архитектурна рамка на допълнителни модули, които да допълнят базовата референтна ViPS архитектура в областта на интелигентното пасищно животновъдство. Представена е разработката на два базови прототипа на тези модули и са обсъдени резултатите от изследването на поведенческите модели на крави, отглеждани свободно на отдалечени пасища, чрез динамично получаваната информация от IoT платформата. Очертани са планове за бъдещи изследвания и са споделени някои идейни модели за разработка на допълнителни компоненти за предвиждане и управление на движението и стадното поведение на животните чрез използване на AI алгоритми.

#### **Основни задачи, решени в дисертационното изследване**

1. Изследвана е необходимостта и възможностите за изграждане на IoT екосистема в областта на интелигентното животновъдство в контекста на пасищно говедовъдство;

2. Разработена е подходяща софтуерна архитектура на платформата;

3. Разработени са сензорни устройства и са създадени два прототипа на софтуерна и хардуерна IoT платформа за интелигентно пасищно говедовъдство

4. Предложен е подход за обработка и анализ на получените данни за изследване на поведението на кравите при пасищно отглеждане в създадените прототипи.

## Резултати от научното изследване

При изпълнението на задачите за постигане на основните цели можем да определим следните актуални резултати (приноси) от научното изследване:

1. Създадена е обща концепция за изграждане на IoT екосистема в областта на интелигентното животновъдство.
2. Създадени са конкретни модели за приложение на разработената концепция при адаптацията на референтната ViPS архитектура в сферата на интелигентното пасищно животновъдство.
3. Създадени са прототипи, чрез които да се тества приложението на проектираната IoT среда за интелигентно животновъдство.
4. Предложен е подход за обработка и анализ на получените данни за изследване поведението на кравите при пасищно отглеждане в създадените прототипи.

Връзката между резултатите, задачите, структурата на дисертацията и публикациите, участващи в процедурата са представени в следната таблица.

| Задача | Резултат/Принос | Глава   | Публикации |
|--------|-----------------|---------|------------|
| 1      | 1               | 1       | 1, 2       |
| 2      | 2               | 1, 2, 3 | 1, 2       |
| 3      | 3               | 2, 3    | 1, 2       |
| 4      | 3,4             | 2,3,4   | 1, 2       |

## Апробации

### Участие в проекти:

Проект „Дигитални устойчиви екосистеми – технологични решения и социални модели за устойчивост на екосистеми (ДУЕкоС) - BG-RRP-2.004-0001-C01, като изследовател през 2023 г.

### Доклади на научни конференции:

1. Международна конференция „International Conference Automatics and Informatics (ICAI), Varna, Bulgaria, 1-3 октомври 2021 с доклад „INFRASTRUCTURE MODEL OF INTELLIGENT PASTURE “.
2. Международна конференция „Big Data, Knowledge and Control Systems Engineering (BdKCSE)", Варна, ноември 2021 с доклад „MODELING OF A SYSTEM FOR INTELLIGENT ANIMAL HUSBANDRY"
3. Международна конференция 7th IFAC Conference on Sensing, Control and Automation Technologies for Agriculture, 14-16 September 2022, Munich, Germany с доклад „APPROACH FOR MODELING AND IMPLEMENTATION OF AN INTELLIGENT SYSTEM FOR LIVESTOCK CATTLE ON PASTURES“.
4. Международна конференция „Informatics, Mathematics, Education and Their Applications (IMEA'2024)", Пампорово, 13-15 ноември 2024 г. с доклад „AN INFRASTRUCTURE APPROACH TO BUILDING AN IOT ECOSYSTEM FOR AGRICULTURE“
5. Участие в регулярни научни семинари, организирани от ИИКТ на БАН за работата по националната програма „Интелигентно селско стопанство“ с доклади за текущото състояние на IoT платформата за интелигентно животновъдство.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Valchev, E., Todorov, J., Stoyanov, I., Monov, V., Dimitrov B., and L. Doukovska, "Infrastructure Model of Intelligent Pasture," 2021 International Conference Automatics and Informatics (ICAI), Varna, Bulgaria, 2021, pp. 318-321, doi: 10.1109/ICAIS2893.2021.9639655. (**SCOPUS**)
2. Valchev, E., Malinov, P., Glushkova, T., Nikolov, V., Doukovska L. and V. Monov, "Modeling of a system for intelligent animal husbandry," 2021 Big Data, Knowledge and Control Systems Engineering (BdKCSE), 2021, pp. 1-8, doi: 10.1109/BdKCSE53180.2021.9627312. ISBN:978-1-6654-1042-7 (**SCOPUS**)

## БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] Park, S. O. (2021). Applying a smart livestock system as a development strategy for the animal life industry in the future: A review. *Journal of the Korean Applied Science and Technology*, 38(1), 241-262.
- [2] Symeonaki, E., Arvanitis, K. G., Loukatos, D., & Piromalis, D. (2021). Enabling IoT wireless technologies in sustainable livestock farming toward agriculture 4.0. In *IoT-based Intelligent Modelling for Environmental and Ecological Engineering: IoT Next Generation EcoAgro Systems* (pp. 213-232). Cham: Springer International Publishing.

- [3] Dineva, K., Parvanov, D., Atanasova, T., Mateeva, G., Petrov, P., & Kostadinov, G. (2021, September). Towards CPS/IoT system for livestock smart farm monitoring. In *2021 International Conference Automatics and Informatics (ICAI)* (pp. 252-255). IEEE.
- [4] Stoyanov, S., Glushkova, T., Doychev, E., (2019) *Cyber-Physical-Social Systems and Applications, Part1*, LAP LAMBERT Academic Publishing, ISBN: 978-620-0-31825-1, 2019.
- [5] Глушкова, Т. (2023), Моделиране в кибер-физически системи, изд. на Пловдивския университет „Паисий Хилендарски“, 164 стр., ISBN 978-619-7663-49-5, 2023 Jazdi, N. (2014, May). Cyber physical systems in the context of Industry 4.0. In *2014 IEEE international conference on automation, quality and testing, robotics* (pp. 1-4). IEEE.
- [6] Wang, R., Zhang, Y., & Li, L. (2022). Semiparallel service systems in CPSS: Theory and application. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 10(5), 2335-2349.
- [7] Bader, C., Stumpfenhausen, J., & Bernhardt, H. (2024). Prediction of the Spatial and Temporal Adoption of an Energy Management System in Automated Dairy Cattle Barns in Bavaria—“CowEnergySystem”. *Energies*, 17(2), 435.
- [8] Stoyanov, S., Stoyanova-Doycheva, A., Glushkova, T., Doychev, E. Virtual Physical Space – An Architecture Supporting Internet of Things Applications, 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA): 3-6 June 2018, DOI: 10.1109/SIELA.2018.8447156
- [9] Stoyanov, S., Glushkova, T., Stoyanova-Doycheva, A., Ivanova, V. and Doychev, E. (2019), *Cyber-Physical-Social Systems and Applications- Part1*, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2019, ISBN: 978-620-0-31825-1, 101 pages, <https://www.amazon.com/Cyber-Physical-Social-Systems-Applications-Reference-architecture/dp/6200318255>
- [10] Stoyanov, S., Glushkova, T., Stoyanova-Doycheva, A., Ivanova, V. and Doychev, E. (2019) *Cyber-Physical Social Systems and Applications- Part2. Applications*, Publisher: LAP LAMBERT Academic Publishing (2019-12-23), ISBN: 978-620-0-49831-1, 164 pages, <https://www.amazon.com/Cyber-Physical-Social-Systems-Applications-Part/dp/6200498318>
- [11] Stoyanov, S., Glushkova, T., Stoyanova-Doycheva, A., Todorov, J., Toskova, A., A Generic Architecture for Cyber-Physical-Social Space Applications, Book chapter In: Jardim-Goncalves R., Sgurev V., Jotsov V., Kacprzyk J. (eds), 2020 *Studies in Computational Intelligence*, Vol. 864, pp.319-343, ISSN: 1860949X, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-38704-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-38704-4_14),
- [12] Stoyanov S., Glushkova T., Popchev I., Doukovska L. (2022) Virtualization of Things in a Smart Agriculture Space. In: Sgurev V., Jotsov V., Kacprzyk J. (eds) *Advances in Intelligent Systems Research and Innovation. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 379. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-78124-8\\_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-78124-8_16)
- [13] Stoyanov S.N., Glushkova T.A., Stoyanova-Doycheva A.G., Krasteva I.K. The virtual education space: Concept, architecture, application. *Informatics and education*. 2021;(9):47-54. (In Russ.) <https://doi.org/10.32517/0234-0453-2021-36-9-47-54>
- [14] Stanimir Stoyanov, Asya Stoyanova-Doycheva, Todorka Glushkova, Virtual-Physical Space "Bulgarian Cultural and Historical Heritage", *Cultural and Historical Heritage: Preservation, Presentation, Digitalization*, KIN Journal, volume 7, Issue 2, 2021, DOI: [doi.org/10.26615/issn.2367-8038.2021\\_2\\_005](https://doi.org/10.26615/issn.2367-8038.2021_2_005), ISSN: 2367-8038.
- [15] Todorka Glushkova, Maria Miteva, Asya Stoyanova-Doycheva, Vanya Ivanova, Stanimir Stoyanov, Implementation of a Personal Internet of Thing Tourist Guide, *American Journal of Computation, Communication and Control*, Publication Date: May 10, 2018, Pages: 39-51, ISSN 2375-3943, <http://www.aascit.org/journal/archive?journalId=901&issueId=9010502>
- [16] Kumar, A., et al. (2021). "A Review of Machine Learning in Agriculture: A Case Study of Livestock Management." *Journal of Cleaner Production*, 285, 124851.
- [17] Arulkumaran, K., Deisenroth, M. P., Brundage, M., & Bharath, A. A. (2017). Deep reinforcement learning: A brief survey. *IEEE Signal Processing Magazine*, 34(6), 26-38.
- [18] Wang, X., Wang, S., Liang, X., Zhao, D., Huang, J., Xu, X., ... & Miao, Q. (2022). Deep reinforcement learning: A survey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*.
- [19] Tubaishat, M., & Madria, S. (2003). Sensor networks: an overview. *IEEE potentials*, 22(2), 20-23.
- [20] Alemdar, A., & Ilnkahl, M. (2007, February). Wireless sensor networks: Applications and challenges. In *2007 9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications* (pp. 1-6). IEEE.
- [21] Marais, M., R. Malekian, A. M. Abu-Mahfouz, (2017), LoRa and LoRaWAN testbeds: A review, pp. 1496-1501, *IEEE AFRICON*, DOI: 10.1109/AFRCON.2017. 8095703, Cape Town, 2017.
- [22] Raychowdhury, A., & Pramanik, A. (2020). Survey on LoRa technology: solution for internet of things. *Intelligent Systems, Technologies and Applications: Proceedings of Fifth ISTA 2019, India*, 259-271.
- [23] Aksoy, A., Yildiz, Ö., & Karlik, S. E. (2024). Comparative Analysis of End Device and Field Test Device Measurements for RSSI, SNR and SF Performance Parameters in an Indoor LoRaWAN Network. *Wireless Personal Communications*, 134(1), 339-360.
- [24] Gu, G., & Peng, G. (2010). The survey of GSM wireless communication system. In *2010 international conference on computer and information application* (pp. 121-124). IEEE.
- [25] Terence, S., Immaculate, J., Raj, A., & Nadarajan, J. (2024). Systematic Review on Internet of Things in Smart Livestock Management Systems. *Sustainability*, 16(10), 4073.
- [26] Montalván, S., Arcos, P., Sarzosa, P., Rocha, R. A., Yoo, S. G., & Kim, Y. (2024). Technologies and Solutions for Cattle Tracking: A Review of the State of the Art. *Sensors*, 24(19), 6486.
- [27] Heale, R., & Forbes, D. (2013). Understanding triangulation in research. *Evidence-based nursing*, 16(4), 98-98.
- [28] Tedeschi, L. O., Greenwood, P. L., & Halachmi, I. (2021). Advancements in sensor technology and decision support intelligent tools to assist smart livestock farming. *Journal of Animal Science*, 99(2), skab038.

- [29] Kaswan, S., Chandratre, G. A., Upadhyay, D., Sharma, A., Sreekala, S. M., Badgujar, P. C., ... & Ruchay, A. (2024). Applications of sensors in livestock management. In *Engineering Applications in Livestock Production* (pp. 63-92). Academic Press.
- [30] Calderon, G., del Campo, G., Saavedra, E., & Santamaría, A. (2023). Monitoring framework for the performance evaluation of an IoT platform with Elasticsearch and Apache Kafka. *Information Systems Frontiers*, 1-17.
- [31] Ravshanovich, A. R. (2024). DATABASE STRUCTURE: POSTGRESQL DATABASE. *Psixologiya va sotsiologiya ilmiy jurnali*, 2(7), 50-55.
- [32] Valchev, E., Malinov, P., Glushkova, T., Nikolov, V., Doukovska L. and V. Monov, "Modeling of a system for intelligent animal husbandry," 2021 Big Data, Knowledge and Control Systems Engineering (BdKCSE), 2021, pp. 1-8, doi: 10.1109/BdKCSE53180.2021.9627312. ISBN:978-1-6654-1042-7
- [33] Valchev, E., Malinov, P., Glushkova, T., Stoyanov, S. (2022), APPROACH FOR MODELING AND IMPLEMENTATION OF AN INTELLIGENT SYSTEM FOR LIVESTOCK CATTLE ON PASTURES, IFAC-PapersOnLine, Volume 55, Issue 32, 2022, Pages 211-216, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.11.141>
- [34] Malinova, R., Malinov, P., Valchev, E., & Glushkova, T. (2024). Approach to creating an intelligent system for free-range livestock farming. *Czech Journal of Animal Science*, 69(10), 389-399. doi: 10.17221/90/2024-CJAS
- [35] Umstätter, C., Waterhouse, A., & Holland, J.P. (2008). An automated sensor-based method of simple behavioural classification of sheep in extensive systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 64, 19–26