

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Объект авторского права  
УДК 621.396.946

**ЛАКИЗО**  
**Павел Юрьевич**

**МЕТОДИКА И АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ  
РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА СОТОВОЙ СВЯЗИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальностям:

- 05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям),
- 05.13.06 – автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)

Минск, 2026

Научная работа выполнена в УО «Белорусская государственная академия связи»

Научный руководитель **Вишняков Владимир Анатольевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры инфокоммуникационных технологий учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Булойчик Василий Михайлович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории (моделирование военных действий) научно-исследовательской части учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»  
**Белоцерковский Алексей Маратович**, кандидат технических наук, заведующий отделом интеллектуальных информационных систем ГНУ «Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси»

Оппонирующая организация **Белорусский национальный технический университет**

Защита состоится «21» мая 2026 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.01 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан «16» апреля 2026 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций Д 02.15.01  
доктор технических наук, профессор



М.М. Татур

## **ВВЕДЕНИЕ**

Автоматизация процессов эксплуатации сетей сотовой связи является основополагающим условием развития цифровой экономики. Для реализации этого необходимо развитие и модернизация технологических процессов в отрасли. Одной из главных проблем эксплуатации радиочастотного спектра (РЧС) сотовой связи является его дефицит. Это связано не только с его свойствами как ресурса, но и с неэффективностью его использования.

Используемая в Республике Беларусь автоматизированная система управления показала свою высокую эффективность, надежность, но при этом технологический процесс по эксплуатации сотовой связи автоматизирован не в полном объеме. Часть операций технологического процесса, таких как, проектирование, построение, развертывание сетей сотовой связи, определение требуемого количества базовых станций, вычисление эффективности используемого радиочастотного спектра, настройка и регулировка телекоммуникационного оборудования выполняется силами специалистов государственных органов и организаций или рабочими мобильных бригад по обслуживанию базовых станций и остаются без применения средств автоматизации, либо требуют доработки алгоритмов их автоматизации.

Одним из ключевых направлений отрасли связи является развитие автоматизации, цифровизации и создание современной и защищенной инфраструктуры технологического процесса, обеспечивающего предоставление услуг сотовой связи высокого качества. Необходимость такой модернизации обусловлена ежегодно растущей нагрузкой на радиочастотный спектр используемый в сотовой связи, появлением новых услуг и потребителей, совершенствованием и обновлением используемого подконтрольными организациями радиооборудования.

Для эффективного обеспечения технологического процесса по эксплуатации сотовой связи необходима модернизация и разработка средств автоматизированного управления сетями сотовой связи, создающих условия для обеспечения контроля за работой операторов сотовой связи. Это обусловило актуальность проведения научного исследования по разработке методики и алгоритмов технологического процесса эксплуатации радиочастотного спектра сотовой связи, программную реализацию системы управления процессами измерения, контроля и учета использования РЧС сети сотовой связи, позволяющую повысить эффективность выполнения функций учета и контроля за эксплуатацией сотовой связи.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Диссертационная работа выполнена на кафедре телекоммуникационных систем учреждения образования «Белорусская государственная академия связи». Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям:

Цифровые технологии и искусственный интеллект: «технологии искусственного интеллекта», «технологии сбора, хранения, обработки, защиты, высокоскоростной передачи и распределения информации, кибербезопасность», «математические теории и методы, высокопроизводительные вычислительные системы, цифровые модели и двойники» которые приведены в Указе Президента Республики Беларусь от 01.04.2025 №135 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2026 – 2030 годы».

Результаты диссертационной работы были получены при выполнении следующих НИР в БГАС: «Аппаратно-программная система обеспечения информационной безопасности и энергетической эффективности беспроводной цифровой передачи данных на основе технологий поколения 5G и методов нелинейной динамики» задания «Современные беспроводные системы передачи данных» в составе ГПНИ «Цифровые и космические технологии, безопасность человека, общества и государства 1.5.6» подпрограммы 5.1 «Цифровые технологии и космическая информатика» на 2021 – 2025 годы, договор с БГАС № ФИ 06-21 от 29.11.2021 (№ГР 20220041, 2021 – 2025 г.); «Разработка рекомендаций по формированию экономически обоснованных размеров плат за выделение и использование радиочастотного спектра для оказания услуг электросвязи общего пользования по стандартам технологии 5G», договор с БГАС № 01-19 от 11.02.2019 (№ГР 20190711, 2019 г.); «Разработка рекомендаций по совершенствованию методики расчета платы за выделение и использование радиочастотного спектра для всех видов радиосвязи», договор с БГАС № 01-20 от 29.06.2020 (№ГР 20201458, 2020 г.); «Разработка проекта профессионального стандарта на вид трудовой деятельности «Тестирование программного обеспечения», договор с БГАС № 01-21 от 15.02.2021 (№ГР 20211317, 2021 г.); «Разработка научно обоснованных требований к параметрам и показателям качества услуг сотовой подвижной электросвязи в сетях LTE и 5G», договор с БГАС № 04-22 от 28.04.2022 (№ГР 20221054, 2022 г.).

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

Целью диссертационной работы является разработка методики управления технологическим процессом эксплуатации сети сотовой связи, базирующаяся на оценке, учете и контроле технических, экономических и социальных составляющих эффективности использования радиочастотного спектра и алгоритмов автоматизированного построения сетей сотовой связи при их проектировании, развертывании, эксплуатации.

Поставленная цель в работе включает решение следующих задач:

- разработка методики управления технологическим процессом эксплуатации сети сотовой связи, базирующейся на учете и контроле технических, экономических и социальных составляющих РЧС;
- разработка модели оценки эффективности использования технических, экономических и социальных составляющих использования РЧС;

- разработка алгоритма определения требуемого количества базовых станций при автоматизированном построении эталонных моделей сетей подвижной сотовой связи стандарта UMTS;
- разработка алгоритма определения требуемого количества базовых станций при автоматизированном построении эталонных моделей сетей подвижной сотовой связи стандарта LTE;
- разработка алгоритмов и структуры автоматизированной системы управления процессами измерения, контроля и учета использования РЧС сети сотовой связи.

*Объектом исследования* является технологический процесс эксплуатации радиочастотного спектра. В частности, автоматизированное управление сетями сотовой связи.

*Предметом исследования* выступают модели, методика и алгоритмы, обеспечивающие оценку эффективности и управление технологическим процессом при проектировании, развертывании, эксплуатации и модернизации сетей сотовой связи.

### **Научная новизна**

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается в следующих достижениях:

- разработана методика управления технологическим процессом эксплуатации сети сотовой связи, базирующаяся на учете и контроле эффективности использования технических, экономических и социальных составляющих радиочастотного спектра, отличающаяся от известных применением интеграции этих составляющих, что позволяет обеспечить мониторинг в динамической среде;
- разработан алгоритм определения требуемого количества базовых станций, работающих в диапазонах 900 МГц и 2100 МГц, для построения эталонной модели сети подвижной сотовой электросвязи стандарта UMTS в котором параметрами используется максимальное количество одновременных соединений в соте и максимальное количество абонентов в соте в час наибольшей нагрузки, что позволяет в отличие от известных решений использовать их для автоматизации проектирования сети сотовой связи;
- разработан алгоритм определения требуемого количества базовых станций, работающих в диапазонах 800 МГц, 1800 МГц и 2600 МГц, для построения эталонной модели сети подвижной сотовой электросвязи стандарта LTE, в которых параметрами используются количество полос частот и количество ресурсных блоков, что позволяет в отличие от известных решений использовать их для автоматизации проектирования сети сотовой связи;
- разработаны модель, алгоритмы и структура автоматизированной системы управления процессами измерения, контроля и учета параметров сети сотовой связи, реализованная на протоколах Zigbee/Thread IEEE 802.15.4, отличающаяся от известных использованием мультиагентного подхода,

позволяющая оптимизировать расходы по выполнению технологического процесса.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Методика управления технологическим процессом эксплуатации сети сотовой связи, базирующаяся на учете и контроле технических, экономических и социальных составляющих эффективности использования радиочастотного спектра, отличающаяся от известных применением интеграции этих составляющих, что позволяет повысить эффективность эксплуатации сотовой связи не менее чем в 1,18 раза.

2. Алгоритм автоматизированного построения эталонной сети сотовой связи стандарта UMTS на заданной территории заключающейся в определении требуемого количества базовых станций, работающих в диапазонах частот 900 МГц и 2100 МГц, отличающийся от известных учетом при построения сети максимального количества одновременных соединений в соте, а также максимального количества абонентов в соте в час наибольшей нагрузки, что позволяет обеспечивать эффективность построенной сети сотовой связи от 89 % до 100% по сравнению с эталонной сетью.

3. Алгоритм автоматизированного построения эталонной сети сотовой стандарта LTE на заданной территории заключающейся в определении требуемого количества базовых станций, работающих в диапазонах частот 800 МГц, 1800 МГц и 2600 МГц, отличающийся от известных учетом при построения сети количества полос частот и количества ресурсных блоков, позволяющей обеспечивать эффективность построенной сети сотовой связи от 89% до 100% по сравнению с эталонной сетью.

4. Модель, алгоритмы и реализация автоматизированной системы управления процессами измерения, контроля и учета параметров сети сотовой связи, реализованная на протоколах Zigbee/Thread IEEE 802.15.4, отличающаяся от известных использованием мультиагентного подхода, позволяющая оптимизировать расходы по выполнению технологического процесса в не менее 0,105 раза по сравнению с текущими.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Содержание диссертации отображает личный вклад автора. Он заключается в научном обосновании методики и алгоритмов автоматизации технологического процесса эксплуатации сетей сотовой связи, а также разработке модели автоматизированной системы управления процессами измерения, контроля и учета параметров сети сотовой связи. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации результатов.

Определение целей и задач исследований, интерпретация и обобщение полученных результатов проводились совместно с научным руководителем д.т.н., профессором Вишняковым Владимиром Анатольевичем.

В представленных публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации результатов.

### **Апробация результатов диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: «Радиочастотный спектр и технологии 5G в Республике Беларусь: теория и практика расчета платы за выделение частотных диапазонов» (Минск, 2019); 3-я Ежегодная Конференция по управлению спектром для стран СНГ и Центральной и Юго-Восточной Европы (Минск, 2019); XIX-XXI научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых специалистов «Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи» (Минск, 2019-20210); XXVI-XXVI, XXX Международных научно-технических конференциях «Современные средства связи» (Минск, 2019-2021, 2025).

Получены акты внедрения результатов диссертации от Министерства связи и информатизации Республики Беларусь, УО «Белорусская государственная академия связи», ОАО «Гипросвязь».

### **Опубликование результатов диссертации**

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 17 печатных работ, в том числе: 8 статей в научных журналах общим объемом 4,7 авторских листов; 9 тезисов в сборниках и материалах конференций. В публикациях с соавторами вклад автора излагается в рамках диссертации.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, общей характеристики работы, четырех глав с выводами по каждой главе, заключения, списка используемых источников и приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 144 страницы, из них 96 страниц текста, 35 рисунков на 11 страницах, 18 таблиц на 10 страницах, список использованных библиографических источников (70 наименований на 6 страницах), список публикаций автора по теме диссертации (17 наименований на 2 страницах).

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

**Первая глава** посвящена сравнительному анализу методов и средств управления процессом эксплуатации радиочастотного спектра (РЧС) сотовой связи в странах СНГ и за рубежом, который выявил отсутствие единого подхода. Анализ литературы показал, что для Республики Беларусь актуальной задачей является как определение эффективности пользования РЧС государством и действующими операторами сотовой связи, так и оценка

использования этого спектра при внедрении новых поколений связи. При разработке методики и алгоритмов автоматизации технологического процесса эксплуатации сетей сотовой связи в Республике Беларусь необходимо использовать как зарубежный опыт в данном направлении, так и интеллектуализацию управления. На основании проведенного анализа выявлена необходимость разработки для Республики Беларусь модели и средств автоматизации управления технологическим процессом эксплуатации радиочастотного спектра сотовой связи в сложной динамической среде [4–А].

**Во второй главе** выполнена разработка методики автоматизированного управления технологическим процессом эксплуатации сети сотовой связи, базирующаяся на учете и контроле технических, экономических и социальных составляющих общей эффективности радиочастотного спектра сотовой связи. В ней выполняются шаги: вычисление показателей эффективности по каждому из трех составляющих; определение отклонений полученной эффективности от эталонного значения; расчет мероприятий, направленных на достижение показателя общей эффективности равного эталонному значению.

Сущность методики заключается в вычислении каждого вида фактической эффективности сотовой связи по каждому оператору согласно предложенным ниже моделям и критериям с последующим определением отклонений в их значениях по сравнению с эталоном в целях приведения общей эффективности эксплуатации сотовой связи к эталонному значению с использованием автоматизированной многоагентной системы управления. Определение отклонения между фактическим и эталонным значением технической эффективности осуществляется на основании предложенной шкалы ранжирования показателей с диапазоном 1–0,25 и ниже, при этом первый интервал определяет ситуацию, когда техническая эффективность работы оператора соответствует эффективности эталонной сети ( $E_{\text{ЭТАЛ}} \geq 0,89$ ). Последний интервал, характеризующий неэффективную эксплуатацию сотовой связи, установим в границах 0,38–0,25 и ниже, так как при значении эффективности ниже 0,38 снижается коэффициент покрытия и нарушается требование по обеспечению зоны обслуживания в населенных пунктах Республики Беларусь и по автомобильным дорогам.

Показатель экономической эффективности будет соответствовать обратно пропорциональному значению технической эффективности. Это обусловлено необходимостью увеличения ежегодной платы за используемый спектр операторами сотовой связи, в случае образования разрывов между эталонным и фактическим значениями технической эффективности. Чем более неэффективно организован технологический процесс, тем дороже будет плата за РЧС, устанавливаемая операторам сотовой связи. Далее определяется значение первичного эталонного показателя экономической эффективности. В качестве критерия предлагается использовать размер установленной ежегодной платы по выделенному РЧС конкретному оператору.



Определим, что размер ежегодной разовой платы одним конкретным оператором равен значению 1,00 первичного эталонного показателя экономической эффективности. Из этого следует, что значение показателя экономической эффективности будет  $E_3 \geq 1,00$  это обусловлено следующим, в случае если данное значение будет меньше единицы, это означает, что оператор не произвел, либо произвел не в полном объеме оплату за выделенный спектр, а, следовательно, он подлежит изъятию. Единице показатель экономической эффективности будет равен в случае, если оператором будут достигнуты показатели критериев эталонной сети (технической эффективности), в этом случае оператор произведет оплату в размере установленной ежегодной платы. В случае образования отклонения, оператору придется компенсировать его путем достижения показателей экономической эффективности выше, что обеспечивается путем умножения установленной разовой платы за используемый спектр на динамический коэффициент отклонения от эталонной сети.

Единых показателей оценки социальной эффективности нет. Однако, в любом случае, она может быть оценена в соответствии с теоретически обоснованными измерениями, которые при каждом исследовании остаются постоянными: социальная необходимость, социальная полезность, социальная привлекательность [1–А].

Применительно к операторам, использующим радиочастотный спектр, критерий социальной эффективности использования РЧС может быть оценен для ключевых социокультурных групп [12–А]: социальная необходимость, социальная полезность, социальная привлекательность.

Далее производится вычисление общей эффективности РЧС каждого оператора подвижной сотовой связи по эталонной модели с учетом указанных выше параметров по предложенной модели оценки общей эффективности использования РЧС в сотовой связи представленной выражением:  $E = C_1 E_T + C_2 E_3 + C_3 E_c$ , где  $E_T$ ,  $E_3$ ,  $E_c$  – техническая, экономическая и социальная эффективность;  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  – корректирующие коэффициенты для эффективностей технической, экономической и социальной соответственно [5–А].

Приведена работа каждого оператора сотовой связи к эталонному показателю общей эффективности, за счет компенсационных мероприятий путем установления дополнительной ежегодной платы за использование РЧС.

Для оценки общей эффективности использования РЧС пользователем сотовой связи необходимо использовать общую эффективность с учетом значимости (корректирующих коэффициентов), той или иной эффективности, а также ее отсутствия. Определение методики вычисления весовых коэффициентов и их корректировки в зависимости от изменения политики государства в области управления РЧС требует использования агентов многоагентной системы, которые на основании динамической информации будут их корректировать [2–А].

Получены модель и алгоритм, позволяющие определить требуемое количество базовых станций для построения эталонных моделей сетей подвижной сотовой связи стандарта UMTS состоящий из следующих шагов.

Вычислить выигрыш от обработки широкополосного сигнала в сотах стандартов UMTS-900 и UMTS-2100 при передаче голоса, интерактивного мультимедиа, среднескоростного мультимедиа и высокоскоростного мультимедиа (в размах).

Вычислить максимальное возможное количество одновременных соединений в соте стандартов UMTS-900 и UMTS-2100 при передаче от абонентов к БС голоса, интерактивного мультимедиа, среднескоростного мультимедиа и высокоскоростного мультимедиа.

Вычислить максимальное возможное количество одновременных соединений в соте стандартов UMTS-900 и UMTS-2100 при передаче от БС к абонентам голоса, интерактивного мультимедиа, среднескоростного мультимедиа и высокоскоростного мультимедиа на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой при  $j = \overline{1,4}$ ,  $i = \overline{0,3}$ .

Вычислить максимальное количество абонентов  $M_0^{U0,9}$ ,  $M_1^{U0,9}$ ,  $M_2^{U0,9}$ ,  $M_3^{U0,9}$  и  $M_0^{U2,1}$ ,  $M_1^{U2,1}$ ,  $M_2^{U2,1}$ ,  $M_3^{U2,1}$  которых может обслужить в час наибольшей нагрузки одна БС стандартов UMTS-900 и UMTS-2100 на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно в предположении, что каждая БС обслуживает три 120-градусных соты.

Вычислить максимальные возможные радиусы сот БС стандарта UMTS-900  $R_0^{U0,9}$ ,  $R_1^{U0,9}$ ,  $R_2^{U0,9}$ ,  $R_3^{U0,9}$  и максимальные возможные радиусы сот БС стандарта UMTS-2100  $R_0^{U2,1}$ ,  $R_1^{U2,1}$ ,  $R_2^{U2,1}$ ,  $R_3^{U2,1}$  на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно. Максимальные возможные радиусы сот БС стандарта UMTS-900 вычислить используя модель распространения радиоволн Окумура –Хата.

Определить требуемое количество БС стандарта UMTS-900  $K_0^{U0,9}$ ,  $K_1^{U0,9}$ ,  $K_2^{U0,9}$ ,  $K_3^{U0,9}$  и требуемое количество БС стандарта UMTS-2100  $K_0^{U2,1}$ ,  $K_1^{U2,1}$ ,  $K_2^{U2,1}$ ,  $K_3^{U2,1}$  для построения эталонной модели сети сотовой связи на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно.

В качестве параметров эталонных моделей сетей сотовой связи используются количество абонентов, которым оказываются услуги сотовой связи на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой, имеющийся у оператора РЧС, требования к качеству оказываемых услуг.

Вычислить количество БС стандарта UMTS-900  $P_0^{U0,9}$ ,  $P_1^{U0,9}$ ,  $P_2^{U0,9}$ ,  $P_3^{U0,9}$  и количество БС стандарта UMTS-2100  $P_0^{U2,1}$ ,  $P_1^{U2,1}$ ,  $P_2^{U2,1}$ ,  $P_3^{U2,1}$ , требуемых для бесшовного покрытия сотовой связью всей территории с сельской,

пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно по формулам:  $P_i^{U0,9} = \left[ \frac{S_i}{1,5\sqrt{3}(R_i^{U0,9})^2} \right]$ ,  $P_i^{U2,1} = \left[ \frac{S_i}{1,5\sqrt{3}(R_i^{U2,1})^2} \right]$ ,  $i = \overline{0,3}$ .

Вычислить количество БС стандарта UMTS-2100  $A_0^{U2,1}$ ,  $A_1^{U2,1}$ ,  $A_2^{U2,1}$ ,  $A_3^{U2,1}$ , требуемых для оказания услуг сотовой связи в час наибольшей нагрузки на всей территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно:  $A_i^{U2,1} = \left[ \frac{N_i}{M^{U2,1}} \right]$ ,  $i = \overline{0,3}$ .

Если  $P_i^{U2,1} \geq A_i^{U2,1}$ , то беспроводное покрытие территории рассматриваемого типа базовыми станциями стандарта UMTS-2100 обеспечивает требуемую пропускную способность сети сотовой связи в час наибольшей нагрузки. Положить  $K_i^{U0,9} = 0$ ,  $K_i^{U2,1} = P_i^{U2,1}$  и перейти к рассмотрению территории следующего типа. Если  $P_i^{U2,1} < A_i^{U2,1}$ , то положить  $K_i^{U0,9} = 0$ ,  $K_i^{U2,1} = A_i^{U2,1}$  и перейти к рассмотрению территории следующего типа.

Получены модель и алгоритм, позволяющие определить требуемое количество базовых станций, работающих в диапазонах 800 МГц, 1800 МГц и 2600 МГц, для построения эталонной модели сети подвижной сотовой электросвязи стандарта LTE. На первом шаге вычисляется максимальный возможный радиус соты БС диапазона LTE-800  $R_0^{(1)}$ , LTE-1800  $R_0^{(2)}$ ,  $R_1^{(2)}$ ,  $R_2^{(2)}$ ,  $R_3^{(2)}$  LTE-2600  $R_2^{(3)}$ ,  $R_3^{(3)}$  по направлению от АС к БС. Максимальный возможный радиус соты БС стандарта LTE-800 в км на территории с сельской застройкой выражается в виде:

$$R_0^{(1)} = 10^{\left( \frac{A-B+G-Z_0^{(1)}-S-69,55-26,16\lg f+13,82\lg h_0^b + \alpha_0(f, h^a) + K_0(f)}{44,9-6,55\lg h_0^b} \right)}, \quad (1)$$

где  $f$  – средняя частота радиочастотного канала от АС к БС, для БС стандарта LTE-800 можно принять  $f = 857$  МГц;  $\alpha_0(f, h^a)$  – поправочный коэффициент для высоты антенны АС, вычисляется по формуле  $\alpha_0(f, h^a) = h^a(1,1\lg f - 0,7) - (1,56\lg f - 0,8)$ ;  $K_0(f)$  – поправочный коэффициент на тип застройки, вычисляется по формуле  $K_0(f) = 4,78(\lg f)^2 - 18,33\lg f + 40,94$ .

Для значений параметров по умолчанию получено значение  $R_0^{(1)} = 29,05$  км. Максимальный возможный радиус соты БС стандарта LTE-1800 в км на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой выражается в виде:

$$R_i^{(2)} = 10^{\left( \frac{A-B+G-Z_i^{(2)}-S-46,33-33,9\lg f+13,82\lg h_i^b + \alpha(f, h^a) - C_i}{44,9-6,55\lg h_i^b} \right)}, \quad i = \overline{0,3}, \quad (2)$$

где  $f$  – средняя частота радиочастотного канала от АС к БС, для БС стандарта LTE-1800 можно принять  $f = 1755$  МГц;  $\alpha(f, h^a)$  – поправочный коэффициент для высоты антенны АС, вычисляется так же, как в формуле (1);  $C_i$  – поправочные коэффициенты на тип застройки, принимают значения  $C_0 = C_1 = C_2 = 0, C_3 = 3$ .

Для значений параметров по умолчанию получены значения  $R_0^{(2)} = 1,39$  км,  $R_1^{(2)} = 1,0$  км,  $R_2^{(2)} = 0,77$  км,  $R_3^{(2)} = 0,46$  км.

Определить требуемое количество БС стандарта LTE-800  $K_0^{(1)}$ , LTE-1800  $K_0^{(2)}, K_1^{(2)}, K_2^{(2)}, K_3^{(2)}$ , LTE-2600  $K_2^{(3)}, K_3^{(3)}$  для построения эталонной модели сети сотовой связи на территории с городской и плотной городской застройкой соответственно. Алгоритм определения требуемого количества БС состоит из следующих шагов.

1. Вычислить количество БС стандарта LTE-800  $P_0^{(1)}$ , требуемое для бесшовного покрытия сотовой связью всей территории с сельской застройкой, по формуле, Положить  $K_0^{(1)} = P_0^{(1)}$ :

$$P_0^{(1)} = \left\lceil \frac{S_0}{1,5\sqrt{3}(R_0^{(1)})^2} \right\rceil, \quad (3)$$

2. Вычислить количество БС стандарта LTE-1800  $P_1^{(2)}, P_2^{(2)}, P_3^{(2)}$ , требуемое для бесшовного покрытия сотовой связью всей территории с пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно, по формуле:

$$P_i^{(2)} = \left\lceil \frac{S_i}{1,5\sqrt{3}(R_i^{(2)})^2} \right\rceil, \quad i = \overline{1,3}. \quad (4)$$

3. Вычислить суммарную пропускную способность  $H_0, H_1, H_2, H_3$ , которую должна обеспечивать сеть сотовой связи в час наибольшей нагрузки на территории с сельской, пригородной, городской и плотной городской застройкой соответственно, по формуле:

$$H_i = \sum_{j=1}^9 v_j N_{ji}, \quad i = \overline{1,3}. \quad (5)$$

4. Вычислить пропускную способность в час наибольшей нагрузки одной БС стандарта LTE-800  $A_0^{(1)}$ , LTE-1800  $A_0^{(2)}, A_1^{(2)}, A_2^{(2)}, A_3^{(2)}$ , LTE-2600  $A_2^{(3)}, A_3^{(3)}$  по формулам:  $A_0^{(1)} = 3k^{(1)}T_0^{(1)} / m^{(1)}$ ;  $A_i^{(2)} = 3k^{(2)}T_i^{(2)} / m^{(2)}$ ,  $i = \overline{0,3}$ ;  $A_i^{(3)} = 3k^{(3)}T_i^{(3)} / m^{(3)}$ ,  $i = \overline{2,3}$ . Приведенные формулы получены в предположении, что каждая БС обслуживает три 120-градусных соты, а кластер с неповторяющимися радиоканалами состоит из  $m^{(j)}$ ,  $j \in \overline{1,3}$ , БС.

5. Если  $A_0^{(1)}K_0^{(1)} \geq H_0$ , то положить  $K_0^{(2)} = 0$  и перейти к шагу 6, иначе вычислить количество БС стандарта LTE-1800  $K_0^{(2)}$ , которое требуется установить на территории сельской застройки для обеспечения требуемой пропускной способности сети, по формуле  $K_0^{(2)} = \lceil (H_0 - A_0^{(1)}K_0^{(1)}) / A_0^{(2)} \rceil$ .

6. Если  $A_1^{(2)}K_1^{(2)} \geq H_1$ , то перейти к шагу 7, иначе вычислить количество БС стандарта LTE-1800  $K_1^{(2)}$ , которое требуется установить на территории пригородной застройки для обеспечения требуемой пропускной способности сети, по формуле  $K_1^{(2)} = K_1^{(2)} + \lceil (H_1 - A_1^{(2)}K_1^{(2)}) / A_1^{(2)} \rceil$ .

7. Если  $A_2^{(2)}K_2^{(2)} \geq H_2$ , то положить  $K_2^{(3)} = 0$  и перейти к шагу 8, иначе вычислить количество БС стандарта LTE-2600  $K_2^{(3)}$ , которое требуется установить на территории городской застройки для обеспечения требуемой пропускной способности сети, по формуле  $K_2^{(3)} = \lceil (H_2 - A_2^{(2)}K_2^{(2)}) / A_2^{(3)} \rceil$ .

8. Если  $A_3^{(2)}K_3^{(2)} \geq H_3$ , то положить  $K_3^{(3)} = 0$  и закончить работу, иначе вычислить количество БС стандарта LTE-2600  $K_3^{(3)}$ , которое требуется установить на территории плотной городской застройки для обеспечения требуемой пропускной способности сети, по формуле  $K_3^{(3)} = \lceil (H_3 - A_3^{(2)}K_3^{(2)}) / A_3^{(3)} \rceil$  и закончить работу [7–А].

**В третьей главе** разработана структура автоматизированной системы управления (АСУ) процессами измерения, контроля и учета параметров сети сотовой связи, включающая следующих агентов: интерфейсные хранилища, брокеры, работа в Интернете, вычисление значений трех типов эффективности использования РЧС [3–А, 6–А].

Применение АСУ обусловлено необходимостью использования гибких подходов к получению внешних данных агентами, а также необходимостью решения многозадачных алгоритмов работы. Структура АСУ представлена на рисунке 1 и реализует алгоритм взаимодействия агентов.

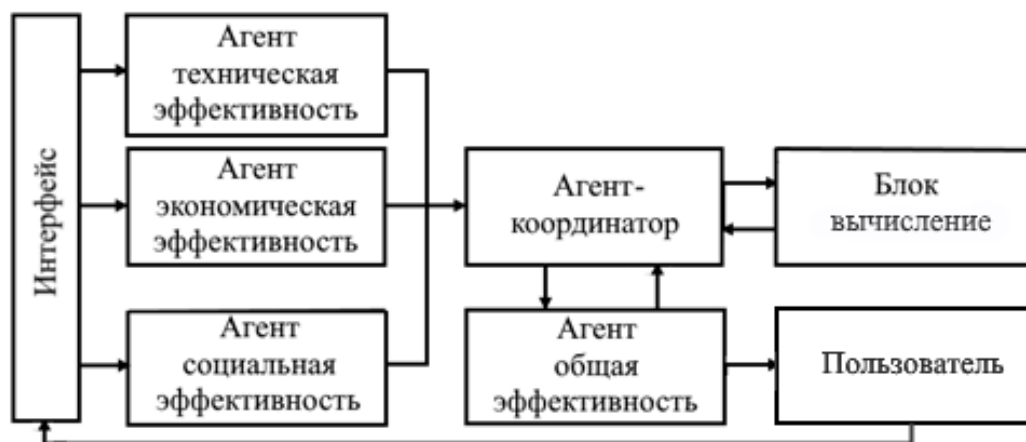


Рисунок 1 – Структура моделирующей АСУ

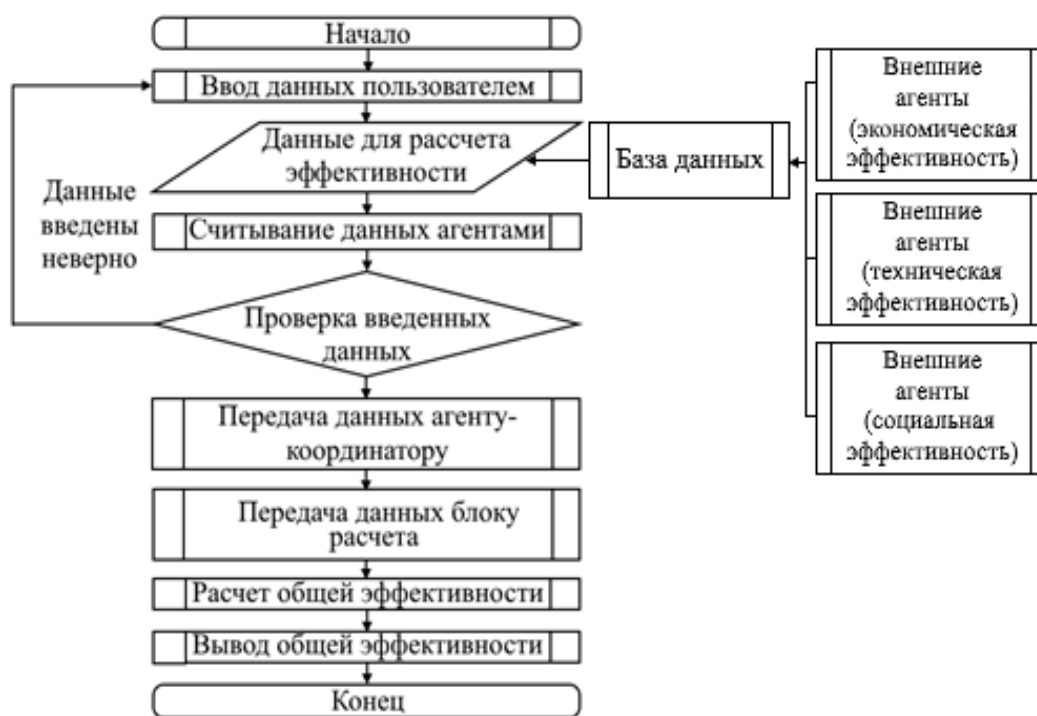
Данные для вычисления трех видов эффективностей обеспечиваются соответствующими агентами с интерфейса пользователя:

- агент-координатор передает данные на блок вычислений;
- блок вычислений рассчитывает общую эффективность и передает данные обратно агенту – координатору;
- агент-координатор передает данные агенту «Эффективность»;
- агент «Эффективность» выводит полученные данные пользователю;
- пользователь – представитель государства, осуществляющий функции контроля за эксплуатацией сотовой связи.

В данной структуре АСУ исходные данные для оценки эффективности использования РЧС вводятся как пользователем, так и агентами, которые собирают исходные динамические данные по территории республики. Коэффициенты значимости ( $C_1$ –  $C_3$ ) для трех составляющих эффективности тоже могут быть реализованы новыми агентами [3–А].

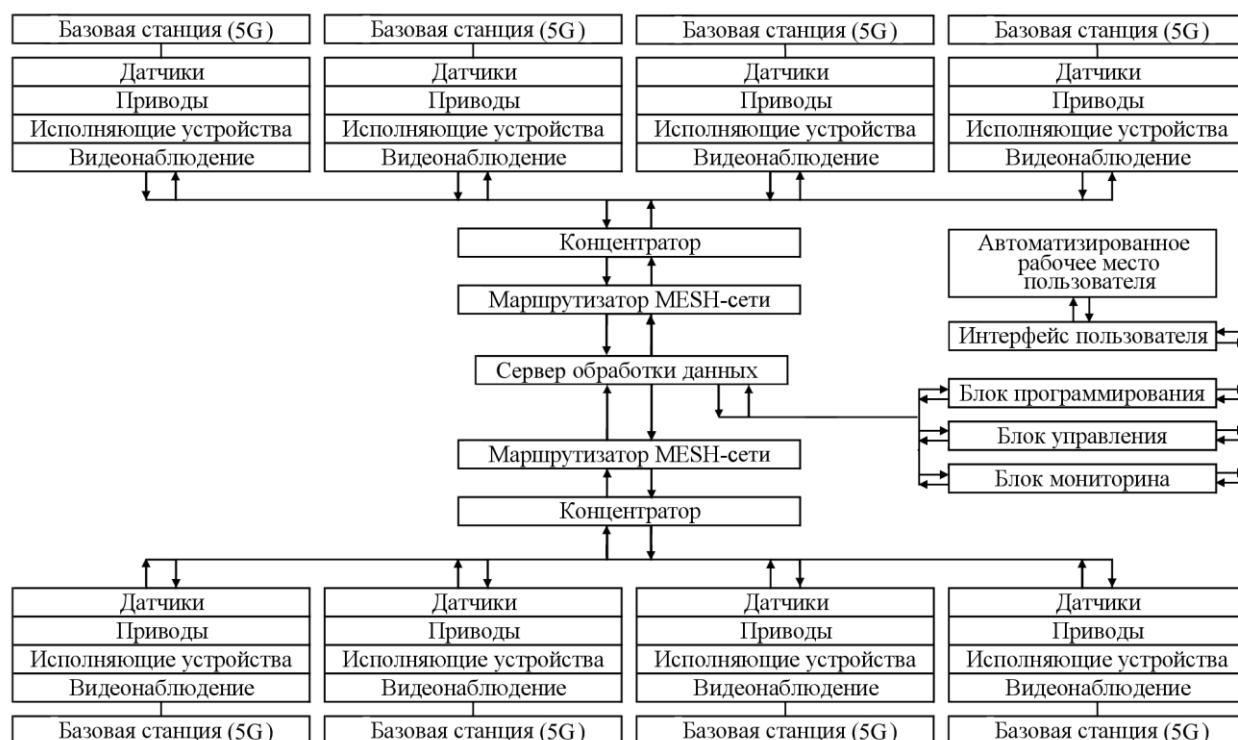
На основании чего предложен алгоритм многоагентной системы, который обеспечит сбор, систематизацию и обобщение исходных динамических данных по территории Республики Беларусь.

Разработан общий алгоритм для вычисления общей, технической, экономической, социальной эффективности (рисунок 2) [12–А, 16–А].



**Рисунок 2 – Общий алгоритм работы АСУ технологическим процессом**

Для организации интеллектуального управления технологическим процессом эксплуатации РЧС сотовой связи разработан и реализован центр интеллектуального управления РЧС сотовой связи. Структура центра, представленная на рисунке 3, в состав которой входят датчики, исполняющие устройства, шлюз, маршрутизатор, сервер обработки информации и автоматизированное рабочее место пользователя оснащенное устройством мониторинга, программирования и управления с пользовательским интерфейсом [6–А].



**Рисунок 3 – Центр интеллектуального управления РЧС сотовой связи**

Датчики и исполняющие устройства, смонтированные на базовых станциях операторов подвижной сотовой связи, удаленно осуществляют сбор и учет статистической и визуальной информации по техническому состоянию базовой станции (время бесперебойной работы, количество отключений, отказу работы отдельных модулей базовых станций, физических повреждениях, несанкционированное присутствие третьих лиц), а также позволят осуществить удаленное управление базовой станцией, в случае возникновения аварийных ситуаций или невнесении платы за РЧС оператором подвижной связи.

**В четвертой главе** разработано программное обеспечение центра интеллектуального управления РЧС сотовой связи, включающее подсистемы: вычисления оценки эффективности использования РЧС, модифицированного интеллектуального голосового ассистента, интерфейса пользователя, взаимодействия со станциями мобильной связи, общего управления.

Интерфейс оператора служит для представления входных и выходных данных АСУ и управлением процессом эксплуатации сотовой связи. Голосовой ассистент выдает всю информацию об процессе эксплуатации сотовой связи, приводит справочные данные. ПО общего управления базируется на программном комплексе для организации mesh-сетей.

В целях автоматизации систем управления используется программное обеспечение с открытым программным кодом на базе операционной системы Linux. Первым этапом моделируется панель управления: Настройки > Панели управления, выбирается Добавить панель управления. В диалоговом окне «Добавить новую панель управления» выбирается наименование групп базовых станций и отображаемую иконку. Устанавливаются права доступа

панели управления для администратора и автоматизированного рабочего места пользователя (АРМП) выбирается кнопка Создать.

В АРМП используется YAML (язык для сериализации данных) для создания дополнительных панелей управления. Каждая панель управления загружается из собственного файла YAML, в том числе реализована возможность добавления панели управления YAML, если основная панель управления настроена через пользовательский интерфейс.

Для создания блока автоматизированного управления базовыми станциями (проект автоматизации) рассмотрим управление световым оборудованием используемым на базовых станциях на основе датчиков движения. Параметры, которые можно использовать с триггер-объектом, поименованы в разделе переменные триггеры автоматизации. Используется триггер состояния `turn_on.turn_off` являющейся действиями для АРМП. Они не привязаны к определенным доменным именам и могут быть использованы на устройствах и исполняющих устройств с другими доменными именами.

Созданный алгоритм автоматизации – это файлы YAML (с `.yaml` расширением) с нахождением в `<config>/blueprints/automation/` папке. Опционально возможно создать столько подкаталогов в этой папке, сколько требуется для обеспечения всех групп базовых станций. Чтобы начать работу с алгоритмом автоматизации, необходимо скопировать приведенный выше YAML-файл автоматизации и сохранить его в этом каталоге под именем `motion_light_tutorial.yaml`. Добавляются метаданные в алгоритм автоматизации путем включения `blueprint:` раздела, содержащего проектное и доменное имен, с возможностью включения описания автоматизации.

Определяются этапы автоматизации, которые являются настраиваемыми. Чтобы сделать датчик движения настраиваемым, необходимо заменить идентификатор на пользовательский тег YAML `!input`. Этот тег YAML должен быть объединен с именем входа. Все части, которые отмечены как входы, должны быть добавлены в метаданные, в том числе их имена, в том же формате как они используются в алгоритме автоматизации. После добавления минимального количества метаданных в алгоритм автоматизации необходимо открыть `configuration.yaml` и добавить программный код. Перезагрузить программное обеспечение, после чего созданная автоматизации отобразится в интерфейсе АРМП [6–А].

Проведено тестирование результатов (рисунок 4,5). По предложенной методике проведено вычисление эффективности использования РЧС сотовой связи по трем операторам сотовой связи. Близким к эталонному показателю общей эффективности является Оператор 2, с значением 0,82, при этом отклонение от эталонного параметра составит  $1,00 - 0,82 = 0,18$ . Таким образом, применение данной модели по использованию общей эффективности РЧС позволит повысить показатель не менее, чем в 1,18 раза по сравнению с действующим значением [5–А].



**Техническая** | **Экономическая** | **Социальная**

Единых показателей оценки социальной эффективности нет. Однако, она может быть оценена в соответствии с теоретически обоснованными измерениями.

1) Социальная необходимость.  
- Соответствие социальной политике государства

$E = \text{Дсоц.аб.} / \text{Дсоц.нез.}$ ,  
где Дсоц.аб. - доля социальных абонентов;  
Дсоц.нез. - доля социально незащищенных граждан на обслуживаемой территории.

- Необходимость оказываемых услуг

$\text{Енеоб} = \text{Ннеобх} / \text{Нпопрош.}$ ,  
где Ннеобх - количество опрошенных, признавших услуги необходимыми;  
Нпопрош - общее количество опрошенных.

2) Социальная полезность.  
- Доступность и высокое качество предоставляемых услуг

$\text{Еус} = \text{Нудовл} / \text{Нпопрош.}$

Дсоц.аб	Дсоц.нез	Ес.пол	Нудв	Нпопрош	Есоотв
1	2	0,5	7	8	0,875
Ннеоб.	Нпопрош	Енеоб.	Нреализ	Нобщ	Есоц.прог
3	4	0,75	9	1	9
Нудв	Нпопрош	Еус			
5	6	0,8333			

$$\frac{C1}{0,2} * \frac{Ес.пол}{0,5} + \frac{C2}{0,2} * \frac{Енеобх}{0,75} + \frac{C3}{0,2} * \frac{Еус}{0,8333} + \frac{C4}{0,2} * \frac{Есоотв}{0,875} + \frac{C5}{0,2} * \frac{Есоц.прог}{9} = \frac{Еобщ}{2,3916}$$

**Рассчитать**

C1	Етех	C2	Еэкон	C3	Есоц	Еобщ
0,2	1,2071	0,2	0,0083	0,6	2,3916	0,5438

**Рассчитать**

Рисунок 4 – Отображение результата в моделирующей программе

**Техническая** | **Экономическая** | **Социальная**

Относительная экономическая эффективность использования РЧС:

$Еэ = \text{Ерчс} / \text{Еэт.}$

где Ерчс - экономическая эффективность использования РЧС i-м пользователем;  
Рассчитывается по формуле:

$\text{Ерчс} = \text{Дгос.}i (Fi * S * T)$

где Дгос.i - годовые доходы государства от i-го пользователя, руб., включают:  
а) прямые доходы - разовая и ежегодная плата пользователя РЧС;  
б) косвенные доходы - налоги пользователей, связанные с использованием РЧС.  
Fi - объем выделенного РЧС, МГц;  
S - площадь территории, на которой осуществляется вещание, км2;  
T - время работы, год.  
Еэт - экономическая эффективность эталона.

В качестве эталонного значения могут быть представлены экспертные значения или максимальные значения эффективности по пользователям.

Дгос	Fi	S	T	Ерчс
1	2	3	4	0,0416
Ерчс	Еэт	Еэкон		
0,0416	5	0,0083		

**Рассчитать**

C1	Етех	C2	Еэкон	C3	Есоц	Еобщ
	1,2071		0,0083			

**Рассчитать**

Рисунок 5 – Отображение результата в моделирующей программе

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Разработана методика управления технологическим процессом эксплуатации сети сотовой связи, базирующаяся на учете и контроле технических, экономических и социальных составляющих эффективности использования радиочастотного спектра, отличающиеся от известных комплексным подходом и автоматизацией процессов эксплуатации [1–А, 2–А, 4–А].

2. Для автоматизированного управления контролем и измерением эффективности использования РЧС использована интегрированная оценка с учетом значимости весовых коэффициентов. Для методики вычисления весовых коэффициентов и их корректировки в зависимости от изменения политики государства в области управления РЧС используются агенты, которые на основании динамической информации их корректируют [2–А, 14–А].

3. Для каждой из трех составляющих эффективности использования радиочастотного спектра представлены критерии для расчета [2–А]. Разработан критерий технической эффективности, который может измеряться

количественно – путем увеличения площади покрытия сетью оператора и качественно – путем уменьшения радиуса соты, увеличения коэффициента повторного использования радиочастот. Критерий экономической эффективности определяет величину поступлений в бюджет, полученную государством с 1 единицы объема РЧС, выделенного на определенной территории, с учетом времени работы пользователя [17–А]. Разработанный критерий социальной эффективности выражается степенью достижения цели деятельности с учетом затрат ресурсов и времени, путем соотношения с общепринятой нормой, уровнем удовлетворенности населения полученной услугой [2–А, 10–А].

4. Разработан алгоритм для автоматизированного построения эталонной сети сотовой связи стандарта UMTS на заданной территории, заключающейся в определении требуемого количества базовых станций, работающих в диапазонах частот 900 МГц и 2100 МГц, отличающийся от известных учетом при построения сети максимального количества одновременных соединений в соте, а также максимального количества абонентов в соте в час наибольшей нагрузки, позволяющей обеспечивать эффективность построенной сети сотовой связи от 89 % до 100 % по сравнению с эталонной сетью [8–А].

5. Разработан алгоритм автоматизированного построения эталонной сети сотовой стандарта LTE на заданной территории заключающейся в определении требуемого количества базовых станций, работающих в диапазонах частот 800 МГц, 1800 МГц и 2600 МГц, отличающийся от известных учетом при построения сети количества полос частот и количества ресурсных блоков, позволяющей обеспечивать эффективность построенной сети сотовой связи от 89 % до 100 % по сравнению с эталонной сетью [5–А, 6–А].

6. Разработаны структура, алгоритм, база данных системы автоматизированного управления использованием РЧС сотовой связи. Представлена структура многоагентной системы управления контролем и измерением РЧС сотовой связи, включающая агентов: интерфейсные, хранилища, брокеры (управления), работы в Интернете, вычисления значений трех типов эффективности РЧС [3–А, 6–А, 12–А 14–А, 17–А].

7. Разработана техническая, информационная и программная составляющая автоматизированной системы управления процессами измерения, контроля и учета параметров сети сотовой связи, реализованная на протоколах Zigbee/Thread IEEE 802.15.4, отличающееся от известных использованием мультиагентного подхода, позволяющая оптимизировать расходы по выполнению технологического процесса в не менее 0,105 раза по сравнению с текущими [3–А, 6–А, 14–А, 16–А].

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Результаты диссертационных исследований были использованы Министерством связи и информатизации Республики Беларусь при подготовке Указа Президента Республики Беларусь от 28.02.2019 N 93 «О

радиочастотном спектре», разработке проекта Стратегии внедрения сетей электросвязи ИМТ-2020 (5G) в Республике Беларусь.

Результаты работы использованы в образовательном процессе учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» при подготовке лекций по дисциплине «Основы построения системы сетей телекоммуникаций».

Результаты диссертационной работы использовались при выполнении НИР в ОАО «Гипросвязь» в части применения разработанной методики для принятия комплексного решения на основе оценки 3-х видов эффективности использования РЧС, а также применены полученные модель и алгоритм определения количества базовых станций для построения эталонных моделей сетей подвижной цифровой связи стандарта UMTS и стандарта LTE.

Положения диссертации могут быть использованы: в научных исследованиях – для развития положений по автоматизации технологического процесса эксплуатации сотовой связи; в учебном процессе – для преподавания учебных дисциплин по специальностям в области автоматизации построения сетей сотовой связи в вузах Республики Беларусь.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦІЙ СОІСКАТЕЛЯ УЧЕНОЇ СТЕПЕНІ**

### **Статті в наукових виданнях в відповідності з п. 19 Положення о присудженні учених степеней и присвоєнні учених звань**

1–А. Вишняков, В. А. Інформаційна оцінка ефективності радіочастотного спектра з використанням багатоагентної технології / В. А. Вишняков, П. Ю. Лакизо // Проблеми інфокомунікацій. – 2019. – № 2 (10). – С. 53–58.

2–А. Вишняков, В. А. Моделі для оцінки ефективності використання радіочастотного спектра на основі мультиагентної технології / В. А. Вишняков, П. Ю. Лакизо // Веснік сувязі. – 2020. – № 6. – С. 60–64.

3–А. Вишняков, В. А. Программная реалізація багатоагентної системи для оцінки ефективності радіочастотного спектра / В. А. Вишняков, П. Ю. Лакизо // Проблеми інфокомунікацій. – 2020. – № 2 (12). – С. 66–71.

4–А. Вишняков, В. А. Управление ефективністю використання радіочастотного спектра на основі аналізу розрахунку розмірів плати в країнах СНГ / В. А. Вишняков, П. Ю. Лакизо // Веснік сувязі. – 2019. – № 5 (157). – С. 60–64.

5–А. Лакизо, П. Ю. Метод прийняття рішення на основі комплексної оцінки ефективності радіочастотного спектра / П. Ю. Лакизо // Доклади БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 3. – С. 41–47.

6–А. Лакизо, П. Ю. Моделирующий центр управління для динамічної оцінки ефективності використання РЧС / П. Ю. Лакизо, В. А. Вишняков // Проблеми інфокомунікацій. – 2025. – № 1 (21). – С. 79–83.

7–А. Лакизо, П. Ю. Построение эталонной модели сети сотовой связи стандарта LTE / П. Ю. Лакизо, А. А. Карпук, Н. И. Кабак // Веснік сувязі. – 2022. – № 5. – С. 48–53.

8–А. Лакизо, П. Ю. Построение эталонных моделей сетей сотовой связи стандартов GSM и UMTS / П. Ю. Лакизо, А. А. Карпук, Н. И. Кабак // Проблеми інфокомунікацій. – 2021. – № 2 (14). – С. 12–19.

### **Матеріали в зарубіжних збірниках наукових конференцій**

9–А. Лакизо, П. Ю. Определение критериев эффективности использования радиочастотного спектра / П. Ю. Лакизо // Телекомунікаційний простір ХХІ сторіччя : ринок, держава, бізнес : Матеріали І міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 18–19 грудня 2019 року) / Навчально-науковий інститут менеджменту та підприємництва ДУТ. – Київ, 2019. – С. 53.

10–А. Лакизо, П. Ю. Экономическая эффективность использования радиочастотного спектра и критерии ее оценки / П. Ю. Лакизо // Телекомунікаційний простір ХХІ сторіччя : ринок, держава, бізнес : Матеріали І міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 18–19 грудня 2019 року) / Навчально-науковий інститут менеджменту та підприємництва ДУТ. – Київ, 2019. – С. 322.

## Материалы в отечественных сборниках научных конференций

11–А. Вишняков, В. А. Оценка эффективности использования радиочастотного спектра с использованием МАС / В. А. Вишняков, П. Ю. Лакизо // Современные средства связи : материалы XXIV Международной науч.-техн. конф., г. Минск, 17–18 окт. 2019 г., / Белорусская государственная академия связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2019. – С. 250.

12–А. Вишняков, В. А. Программная поддержка оценки эффективности использования РЧС / В. А. Вишняков, П. Ю. Лакизо. // Современные средства связи : материалы XXV Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 22–23 окт. 2020 г. / Белорусская государственная академия связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2020. – С. 128–129.

13–А. Лакизо, П. Ю. Австралийский опыт управления использованием радиочастотного спектра / П. Ю. Лакизо // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи : материалы XIX науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов, г. Минск, 14–15 мая 2019 г. / Белорусская государственная академия связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2019. – С. 86.

14–А. Лакизо, П. Ю. Модели и алгоритмы автоматизации технологического процесса эксплуатации сотовой связи / П. Ю. Лакизо, В. А. Вишняков // Современные средства связи : материалы XXX Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 30–31 окт. 2025 г., / Белорусская государственная академия связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2025. – С. 94–96.

15–А. Лакизо, П. Ю. Разработка диаграммы вариантов использования программного средства / П. Ю. Лакизо // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи: материалы XXI науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов, г. Минск, 12–13 мая 2021 г. / Белорусская государственная академия связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2021. – С. 204.

16–А. Лакизо, П. Ю. Разработка интерфейсов для представления входных и выходных данных многоагентной системы в интерактивном режиме / П. Ю. Лакизо // Современные средства связи : материалы XXVI Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 21–22 окт. 2021 г. / Белорусская государственная академия связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2021. – С. 388.

17–А. Лакизо, П. Ю. Экономическая эффективность использования радиочастотного спектра и критерии ее оценки на примере потребителей услуг связи / П. Ю. Лакизо // Новые информационные технологии в телекоммуникациях и почтовой связи : материалы XX науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов, г. Минск 12–13 мая 2020 г., / Белорусская государственная академия связи ; редкол.: А. О. Зеневич [и др.]. – Минск, 2020. – С. 107.

## РЕЗЮМЕ

Лакизо Павел Юрьевич

### **Методика и алгоритмы автоматизации технологического процесса эксплуатации радиочастотного спектра сотовой связи**

**Ключевые слова:** радиочастотный спектр, базовая станция, обработка данных, экспертные системы связи, многоагентные технологии.

**Цель работы:** разработка методики управления технологическим процессом эксплуатации сети сотовой связи, базирующаяся на оценке, учете и контроле технических, экономических и социальных составляющих эффективности использования радиочастотного спектра и алгоритмов автоматизированного построения сетей сотовой связи при их проектировании, развертывании, эксплуатации.

**Методы исследования:** многоагентные системы, нечеткая логика, методы численной оптимизации, методы статистического анализа, а также методы и средства разработки программного обеспечения.

**Полученные результаты и их новизна:** методика управления технологическим процессом эксплуатации сети сотовой связи, базирующаяся на учете и контроле технических, экономических и социальных составляющих радиочастотного спектра; модель и алгоритм автоматизированного построения эталонной сети сотовой связи стандарта UMTS на заданной территории заключающейся в определении требуемого количества базовых станций, работающих в диапазонах частот 900 МГц и 2100 МГц; модель и алгоритм автоматизированного построения эталонной сети сотовой стандарта LTE на заданной территории заключающейся в определении требуемого количества базовых станций, работающих в диапазонах частот 800 МГц, 1800 МГц и 2600 МГц; архитектура автоматизированной системы управления процессами измерения, контроля и учета параметров сети сотовой связи, реализованная на протоколах Zigbee/Thread IEEE 802.15 и ее аппаратно-программная реализация.

**Результаты апробировались и используются:** Министерство связи и информатизации Республики Беларусь, УО «Белорусская государственная академия связи», ОАО «Гипросвязь».

**Областью применения** разработанных методики, алгоритмов, архитектуры являются интеллектуальные системы поддержки принятия решений в области мобильной связи.

## РЭЗІЮМЭ

Лакіза Павел Юр'евіч

### Методыка і алгарытмы аўтаматызацыі тэхналагічнага працэсу эксплуатацыі радыёчастотнага спектра сотавай сувязі

**Ключавыя словы:** радыёчастотны спектр, базавая станцыя, апрацоўка даных, экспертныя сістэмы сувязі, многаагентныя тэхналогіі.

**Мэта працы:** распрацоўка методыкі кіравання тэхналагічным працэсам эксплуатацыі сеткі сотавай сувязі, якая базуецца на адзнацы, ўліку і кантролі тэхнічных, эканамічных і сацыяльных складнікаў эфектыўнасці выкарыстання радыёчастотнага спектра і алгарытмаў аўтаматызаванага пабудовы сетак сотавай сувязі пры іх праектаванні, разгортванні, эксплуатацыі.

**Метады даследавання:** многаагентныя сістэмы, невыразная логіка, метады лікавай аптымізацыі, метады статыстычнага аналізу, а таксама метады і сродкі распрацоўкі праграмнага забеспячэння.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** методыка кіравання тэхналагічным працэсам эксплуатацыі сеткі сотавай сувязі, якая базіруецца на ўліку і кантролі тэхнічных, эканамічных і сацыяльных складнікаў радыёчастотнага спектра; мадэль і алгарытм аўтаматызаванай пабудовы эталоннай сеткі сотавай сувязі стандарту UMTS на зададзенай тэрыторыі складаецца ў вызначэнні патрабаванага колькасці базавых станцый, якія працуюць у дыяпазонах частот 900 МГц і 2100 МГц; мадэль і алгарытм аўтаматызаванага пабудовы эталоннай сеткі сотавай стандарту LTE на зададзенай тэрыторыі складаецца ў вызначэнні патрабаванай колькасці базавых станцый, якія працуюць у дыяпазонах частот 800 МГц, 1800 МГц і 2600 МГц; архітэктурна аўтаматызаваная сістэма кіравання працэсамі вымярэння, кантролю і ўліку параметраў сеткі сотавай сувязі, рэалізаваная на пратаколах Zigbee/Thread IEEE 802.15 і яе апаратна-праграмная рэалізацыя.

**Вынікі апрабаваліся і выкарыстоўваюцца:** Міністэрства сувязі і інфарматызацыі Рэспублікі Беларусь, УА «Беларуская дзяржаўная акадэмія сувязі», ААТ «Гіпрасувязь».

**Вобласцю прымянення** распрацаваных методыкі, алгарытмаў, архітэктур з'яўляюцца інтэлектуальныя сістэмы падтрымкі прыняцця рашэнняў у галіне мабільнай сувязі.

## SUMMARY

Lakizo Pavel Yurievich

### **Methodology and algorithms for automating the technological process of exploiting the radio frequency spectrum of cellular communications**

**Keywords:** radio frequency spectrum, base station, data processing, expert communication systems, multi-agent technologies.

**The objective of the work:** development of a methodology for managing the technological process of operating a cellular network, based on the assessment, accounting and control of technical, economic and social components of the efficiency of using the radio frequency spectrum and algorithms for the automated construction of cellular networks during their design, deployment and operation.

**Research methods:** multi-agent systems, fuzzy logic, numerical optimization methods, statistical analysis methods, as well as software development methods and tools.

**The results obtained and their novelty:** a methodology for managing the technological process of operating a cellular network based on accounting and control of the technical, economic and social components of the radio frequency spectrum; a model and algorithm for the automated construction of a UMTS standard cellular network in a given territory, which consists in determining the required number of base stations operating in the frequency ranges 900 MHz and 2100 MHz; a model and algorithm for the automated construction of a reference LTE cellular network in a given territory, which consists in determining the required number of base stations operating in the frequency ranges 800 MHz, 1800 MHz and 2600 MHz; the architecture of an automated control system for measuring, monitoring and accounting of cellular network parameters, implemented using the Zigbee/Thread IEEE 802.15 protocols and its hardware-software implementation.

**The results have been tested and are being used by:** the Ministry of Communications and Informatization of the Republic of Belarus, the Educational Institution "Belarusian State Academy of Communications", JSC "Giprosvyaz".

**The field of application** of the developed methodology, algorithms, architecture are intelligent decision support systems in the field of mobile communications.



*Научное издание*

**Лакизо Павел Юрьевич**

**МЕТОДИКА И АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЭКСПЛУАТАЦИИ  
РАДИОЧАСТОТНОГО СПЕКТРА СОТОВОЙ СВЯЗИ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальностям:

05.13.01 – системный анализ, управление и обработка информации (по  
отраслям),

05.13.06 – автоматизация и управление технологическими процессами и  
производствами (по отраслям)

Подписано в печать 03.04.2026. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 60 экз. Заказ 45.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,

№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

Ул. П. Бровки, 6, 220013 г. Минск