

*На правах рукописи*



Мигалёв Иван Евгеньевич

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ  
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ  
В ТЕХНОЛОГИЯХ АПК**

Специальность 05.20.02 —

Электротехнологии и электрооборудование в сельском хозяйстве

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Барнаул — 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Сошников Александр Андреевич**

Официальные оппоненты: **Сидоров Александр Иванович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (ЮУрГУ), кафедра «Безопасность жизнедеятельности», заведующий

**Попов Виталий Матвеевич**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Южно-Уральский государственный аграрный университет» (ЮУрГАУ), кафедра «Энергообеспечение и автоматизация технологических процессов», заведующий

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Алтайский государственный аграрный университет»

Защита состоится 16 мая 2018 года в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.004.02 при ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, факс +7 (3852) 36-71-29. Официальный сайт: <https://www.altstu.ru>; электронный адрес: [epb\\_401@mail.ru](mailto:epb_401@mail.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» и на официальном сайте университета <https://www.altstu.ru/media/f/Dissertaciya-Migaleva-I.E..pdf>.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного совета

д.т.н., профессор



Куликова Лидия Васильевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В соответствии с Федеральной научно-технической программой развития сельского хозяйства на 2018 – 2025 годы, перспективным направлением является индустриализация АПК, в том числе, с применением современных электротехнологий в земледелии, кормопроизводстве, животноводстве и переработке сельхозпродукции, во многих случаях связанных с использованием источников электромагнитного излучения (ЭМИ), создающими электромагнитные поля (ЭМП), иногда с существенным превышением предельно допустимых уровней. При этом опасность ЭМИ часто недооценивается, а необходимая защита применяется не всегда, несмотря на то, что соответствующие технологии обычно требуют постоянного присутствия персонала.

**Степень разработанности темы.** Известные способы контроля параметров ЭМП имеют узкую область применения и реализуют измерение только отдельных составляющих в контрольных точках. Поэтому проблематичным является получение полной картины опасности контролируемого пространства для всех составляющих поля и возможных частот излучения.

Одним из перспективных подходов к оценке электромагнитной обстановки, предложенном в в Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова, является формирование картины электромагнитной опасности в виде карты допустимого времени пребывания человека в различных зонах исследуемого пространства по результатам выявления наиболее опасных составляющих ЭМИ и последующего компьютерного моделирования ЭМП. Однако предложенный подход не в полной мере отражает объективную картину электромагнитной обстановки и не позволяет детально оценить последствия внедрения всей рациональной совокупности защитных мероприятий из-за игнорирования опасности совокупного воздействия ЭМИ различных частот и трудоёмкости практической реализации при неавтоматизированном взаимодействии с ЭВМ.

Для повышения эффективности контроля состояния электромагнитной обстановки требуется развитие существующего подхода и совершенствование принципов многочастотного контроля электромагнитных излучений.

**Целью работы явилось** создание мобильной системы автоматизированного контроля и оценки опасности электромагнитных излучений, используемых в технологиях АПК, для обоснованного выбора защитных мероприятий.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи.**

1. В рамках концепции оценки опасности при отдельном и совокупном влиянии ЭМИ обосновать требования к математической модели и выбрать методику моделирования ЭМП.
2. Систематизировать методы определения допустимого времени пребывания в различных зонах исследуемого пространства с учётом возможности

совокупного многочастотного воздействия ЭМИ для формирования картин их опасности.

3. Разработать принципы и алгоритмы формирования картин опасности ЭМИ с учётом диапазонов рабочего пространства людей в исследуемых помещениях.

4. Обосновать функциональные показатели и представить конструктивную реализацию мобильной системы автоматизированного контроля ЭМИ, обеспеченную пакетом специализированных программ.

5. Выполнить экспериментальную проверку системы контроля и оценить её социально-экономические показатели и возможности использования результатов мониторинга электромагнитной обстановки для выбора защитных мероприятий.

Работа выполнена в соответствии с Концепцией развития аграрной науки и научного обеспечения АПК России до 2025 года, аналитической ведомственной целевой программой Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009 – 2011 годы)» и поддержана грантом МГ-2015/04/2 некоммерческого партнёрства по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная Энергия» (2015 – 2016 гг.).

#### **Научную новизну представляют:**

– метод оценки состояния электромагнитной обстановки с помощью картин опасности, полученных по результатам ограниченного числа измерений и моделирования электромагнитного поля с учётом возможности одновременного влияния и усиления результирующего действия нескольких источников электромагнитного излучения;

– принципы преобразования картин распределения параметров электрических, магнитных полей и плотности потока энергии, полученных в результате моделирования, в картины опасности по результатам выполненной систематизации методов определения допустимого времени пребывания в зоне действия электромагнитных излучений с учётом составляющих электромагнитного поля;

– технология построения цилиндрических, а также комбинированных картин опасности, учитывающих усиление результирующего действия электромагнитных излучений.

#### **Теоретическую и практическую значимость представляют:**

– переносной технологический модуль, включающий взаимодополняющую совокупность измерительных приборов для контроля составляющих электромагнитного поля, объединённых с помощью аппаратных адаптеров в единую информационно-измерительную систему с выходом на персональный компьютер;

– пакет специализированных программ по автоматизации измерений, построению трёхмерных моделей помещений с источниками электромагнитных излучений, моделированию электромагнитного поля с применением средств

моделирования openEMS и MEEP, анализу результатов моделирования и формированию картин опасности;

– методика оценки состояния электромагнитной обстановки на основе моделирования электромагнитного поля по результатам ограниченного числа измерений и построения картин опасности ЭМИ с использованием технологического модуля.

**Методология и методы исследования.** Методология исследований заключалась в анализе и использовании методов и средств контроля и моделирования электромагнитных полей на основе теории электромагнитного поля, вычислительных методов решения систем дифференциальных уравнений, компьютерного моделирования.

**На защиту выносятся следующие основные положения.**

1. Оценка опасности электромагнитных излучений, используемых в технологиях АПК, может производиться с помощью картин опасности в виде карты допустимого времени пребывания человека в различных зонах исследуемого пространства, полученных по результатам ограниченного числа измерений и моделирования электромагнитного поля с учётом возможности одновременного влияния и усиления результирующего действия нескольких источников электромагнитного излучения.

2. Для многочастотного моделирования электромагнитного поля целесообразно использовать метод конечных разностей во временной области, позволяющий учитывать раздельное и совокупное влияние электромагнитных излучений при построении картин их опасности.

3. Преобразование картин распределения параметров электрических, магнитных полей и плотности потока энергии, полученных в результате моделирования, в точечные, цилиндрические и комбинированные картины опасности может быть произведено по результатам выполненной систематизации методов определения допустимого времени пребывания в зоне действия электромагнитных излучений с учётом составляющих электромагнитного поля.

4. Техническую реализацию рассмотренных принципов оценки состояния электромагнитной обстановки обеспечивает переносной технологический модуль, включающий взаимодополняющую совокупность измерительных приборов для контроля составляющих электромагнитного поля, объединённых с помощью аппаратных адаптеров и пакета специализированных программ в единую информационно-измерительную систему с выходом на персональный компьютер.

5. Разработанная методика контроля электромагнитной обстановки с помощью технологического модуля позволяет выбирать эффективные защитные мероприятия при многократном сокращении трудоёмкости и времени проведения необходимых измерений.

**Степень достоверности и апробация результатов работы.** В процессе испытаний технологического модуля при исследовании параметров электромагнитного поля, создаваемого источниками СВЧ-излучения, подтверждена

адекватность моделирования методом конечных разностей во временной области и правомерность использования реализуемых компьютерных моделей, проверена возможность формирования точечных и цилиндрических картин опасности при раздельном и комбинированном воздействии электромагнитных излучений и подтверждено повышение степени опасности при комбинированном воздействии.

Материалы и результаты работы представлялись и обсуждались на II-ой Всероссийской студенческой конференции с международным участием «Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи» (Челябинск, 2011 г.); на VIII – XIV Всероссийских научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодёжь», проводимых Алтайским государственным техническим университетом (Барнаул, 2011 – 2017 гг.), на II Международной заочной научно-практической конференции «Проблемы техносферной безопасности» (Барнаул, 2016 г.) а также на IX, XI, XIV международных научно-практических интернет-конференциях «Энерго- и ресурсосбережение — XXI век» (Орёл, 2011, 2013 и 2016 гг.).

Апробация работы проводилась:

- на объектах филиала сетевой компании «Алтайкрайэнерго» «Новоалтайские межрайонные электрические сети», г. Новоалтайск;
- в институте инженерных систем и энергетики ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет» (г. Красноярск).

Результаты работы внедрены в учебный процесс бакалавриата при изучении студентами дисциплины «Электромагнитная безопасность» и используются в тематике выпускных квалификационных работ по направлению подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

**Публикации.** Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 23 печатных работах, в том числе: 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 2 статьи в изданиях из библиографической базы Scopus, патент на изобретение и 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 4 таблицы, 9 приложений. Список литературы включает 128 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи исследования, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость, описаны методология и методы исследования, изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту, приведены сведения о степени достоверности и апробации результатов работы.

**В первой главе «Перспективы развития методов оценки опасности электромагнитных излучений на объектах АПК»** проведён анализ источни-

ков ЭМИ, применяемых в АПК, а также методов контроля состояния электромагнитной обстановки, и намечены направления их совершенствования на основе автоматизированного многочастотного контроля.

К основным группам оборудования, представляющим опасность в технологиях АПК, можно отнести: электротехнологическое оборудование в производственных процессах; информационно-технологическое оборудование, включая компьютерную технику; высоковольтное и сильноточное оборудование, электрические распределительные щиты, силовую и осветительную электропроводку; стационарные и переносные бытовые электроприборы, включая люминесцентные электрические лампы; оборудование для радиосвязи, в том числе мобильные телефоны; вторичные источники электромагнитных излучений: трубопроводы, радиаторы отопления, металлическую арматуру.

На рисунке 1 приведена классификация источников электромагнитного излучения в АПК с разделением по видам поля и соответствующим производственным технологическим процессам.

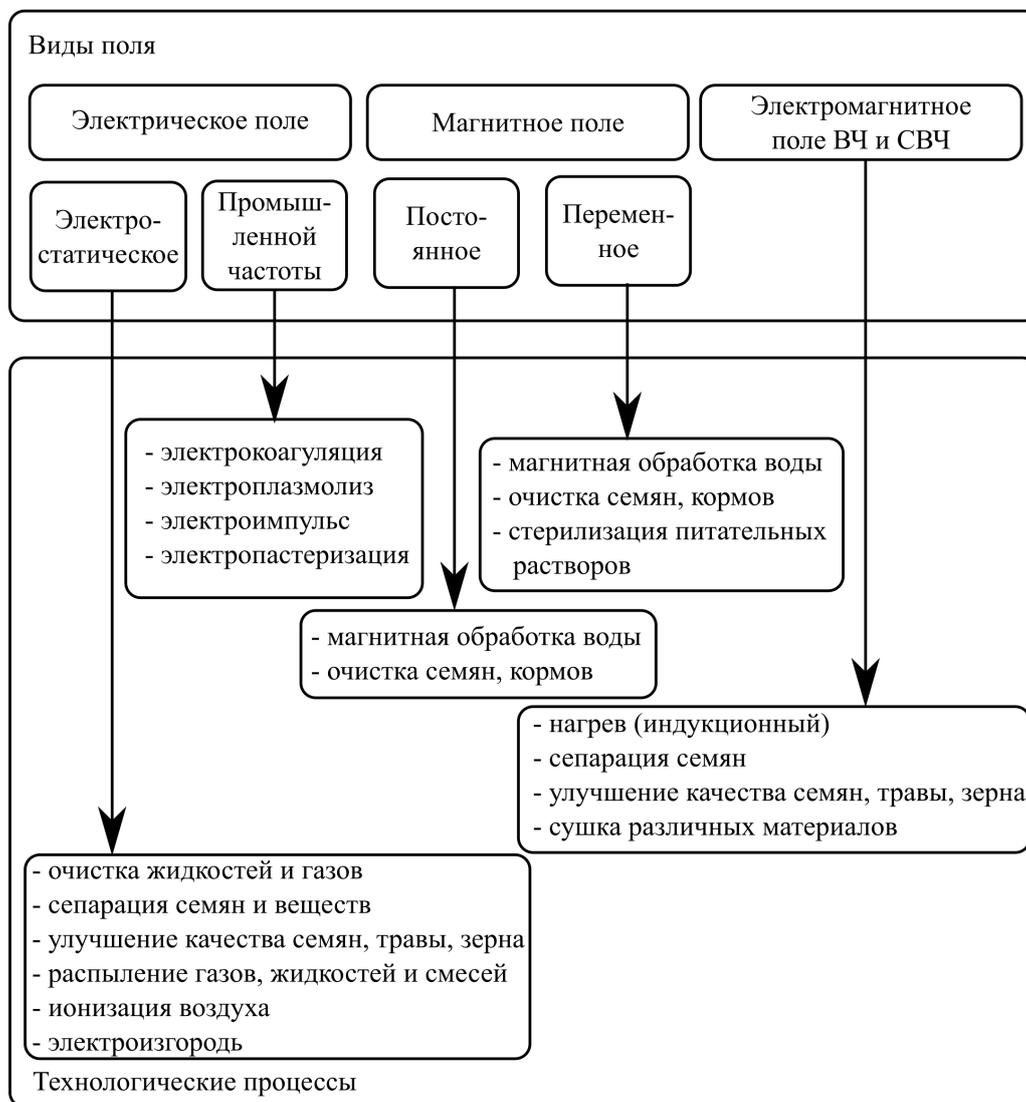


Рисунок 1 – Классификация источников электромагнитного излучения в производственных технологиях АПК

Для управления технологическими процессами, решения административных задач, ведения документооборота, а также организации систем связи на современных объектах АПК используются и другие источники ЭМИ, в частности, компьютерная техника, сотовые телефоны и т.п. При этом защита от ЭМП применяется не для всех потенциально опасных источников ЭМИ, несмотря на то, что они требуют регулярного обслуживания или постоянного присутствия персонала.

Необходимость постоянного контроля параметров ЭМП в опасных технологиях АПК подтверждается рассмотренными последствиями негативного влияния ЭМИ на организм человека.

В результате анализа современных способов контроля электромагнитной обстановки, установлено, что они имеют узкую область применения и реализуют измерение только отдельных составляющих в контрольных точках. Поэтому проблематичным является получение полной картины опасности контролируемого пространства для всех составляющих поля и возможных частот излучения.

Обладающий рядом преимуществ подход к оценке электромагнитной обстановки, предложенный в Алтайском государственном техническом университете им. И. И. Ползунова, основанный на использовании формируемой картины электромагнитной опасности по результатам выявления наиболее опасных составляющих ЭМИ и последующего компьютерного моделирования ЭМП, не в полной мере отражает объективную картину электромагнитной обстановки и не позволяет детально оценить последствия внедрения всей рациональной совокупности защитных мероприятий. Причины этого заключаются в следующем:

- для компьютерного моделирования пространственной картины ЭМИ используются только те составляющие ЭМП, которые соответствуют наименьшему допустимому времени пребывания людей в зонах воздействия излучения от внешних поверхностей источников ЭМИ, в то время как другие составляющие игнорируются;

- используемая для моделирования программная среда не позволяет решать все задачи моделирования ЭМП, в том числе, оценку совокупного воздействия ЭМИ различных частот;

- форма представления картины опасности ЭМИ не позволяет во всех случаях определять допустимое время пребывания в отдельных зонах помещения, так как область рабочей зоны человека может выходить за пределы конкретных областей помещения, для которых установлены различные значения допустимого времени, а также включать совокупность таких областей.

Кроме того, необходимо отметить трудоёмкость практической реализации предложенного подхода из-за сложности обработки и представления в требуемом виде данных в процессе очередного измерения контролируемых параметров, а также неавтоматизированного взаимодействия с ЭВМ.

С учётом проведённого анализа определены направления совершенствования рассмотренного подхода, сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе «Представление картин опасности электромагнитных излучений по результатам компьютерного моделирования»** рассмотрены современные способы моделирования электромагнитных полей, а также практическое применение метода конечных разностей во временной области. Сформулированы принципы формирования картин опасности ЭМИ, проведена систематизация методов определения допустимого времени пребывания в различных зонах исследуемого пространства, а также описана технология представления картин опасности ЭМИ.

Для решения систем дифференциальных уравнений, применяемых при моделировании ЭМП, рекомендовано использование метода конечных разностей во временной области, сущность которого состоит в замене частных производных в каждой точке пространства конечными разностями, зависящими от значений параметра в соседних точках пространства. Метод позволяет рассматривать широкий частотный диапазон ЭМИ, при этом учитывая совокупное влияние различных частотных составляющих ЭМП.

С участием автора разработано программное обеспечение (ПО), использующее открытые реализации метода конечных разностей во временной области: openEMS и MEER. Программы позволяют решать задачу моделирования параметров ЭМП в помещении на основании результатов ограниченного числа измерений. В соответствии с разработанным алгоритмом формируется трёхмерная модель помещения с источниками ЭМИ, грани которых рассматриваются как самостоятельные источники, а модель учитывает их совместное влияние.

По результатам моделирования строится картина опасности, представляющая собой карту допустимого времени пребывания человека в различных зонах исследуемого пространства, путём преобразования узловых значений шкал напряжённости электрического, магнитного полей или плотности потока энергии в узловые значения допустимого времени пребывания в опасных зонах. Полученная таким образом картина опасности, называемая точечной, представляет собой изображение в виде цветных областей, окрашенных в различные тона в зависимости от числового значения допустимого времени. Справа помещается шкала допустимого времени, с помощью которой можно визуально определить потенциально опасные зоны в зависимости от цветового оттенка изображения в любой области моделируемого пространства.

Точечную картину опасности удобно использовать для непроизводственных условий. В производственных условиях с фиксированными областями рабочих зон такая форма не позволяет во всех случаях определять допустимое время пребывания в отдельных зонах, так как рабочая зона может выходить за пределы конкретных областей помещения, для которых установлены различные значения допустимого времени, а также включать совокупность таких областей.

Учесть возможные диапазоны рабочего пространства людей в контролируемых помещениях и исключить различные значения допустимого времени пребывания для различных точек одной области рабочего пространства позво-

ляет цилиндрическая картина опасности. Эта картина представляет собой пространственную совокупность цилиндрических зон помещения с заранее заданным радиусом, каждая из которых характеризуется одним значением допустимого времени пребывания человека.

В случае совокупного (комбинированного) воздействия ЭМИ построение картины опасности, называемой далее, наложенной картиной, является весьма сложной задачей, которая имеет неоднозначные решения.

Наиболее простым способом построения наложенной картины является механическое наложение картин опасности. Процесс получения наложенной картины иллюстрирует рисунок 2, где показано, что зоны с более высокой опасностью перекрывают зоны с меньшей опасностью. Каждая точка совокупной картины принимает максимальное из значений, представленных в этой же точке на исходных картинах опасности.

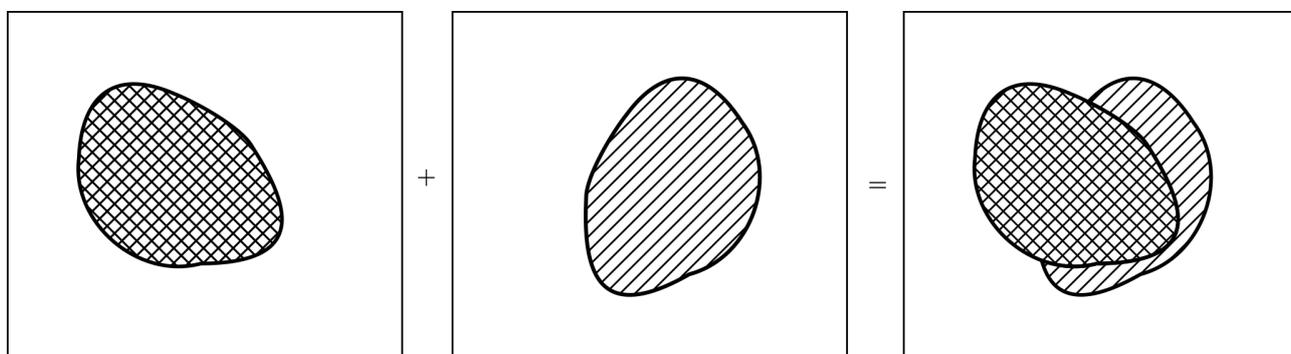


Рисунок 2 – Принцип преобразования картин опасности способом наложения (двойная штриховка соответствует большей опасности)

Достоинством способа является простота реализации и нетребовательность к вычислительным ресурсам. Способ позволяет формировать как точечные, так и цилиндрические картины опасности. Его целесообразно использовать для экспресс-оценки электромагнитной обстановки.

Для получения объективной картины опасности, учитывающей усиление результирующего комплексного воздействия ЭМИ, предложен способ построения наложенной картины, основанный на выделении области пересечения накладываемых зон, как показано на рисунке 3. Зона пересечения областей действия нескольких разнородных источников ЭМИ характеризуется повышенным уровнем опасности.

Практическая реализация предложенного подхода базируется на значениях допустимого времени пребывания в ЭМП различного диапазона частот и различной интенсивности. Эти значения не всегда явно представлены в нормативных документах. Методика преобразования картин распределения параметров электрических, магнитных полей и плотности потока энергии, полученных в результате моделирования, в картины опасности разработана в результате проведенной систематизации методов определения допустимого времени пребывания в различных зонах исследуемого пространства.

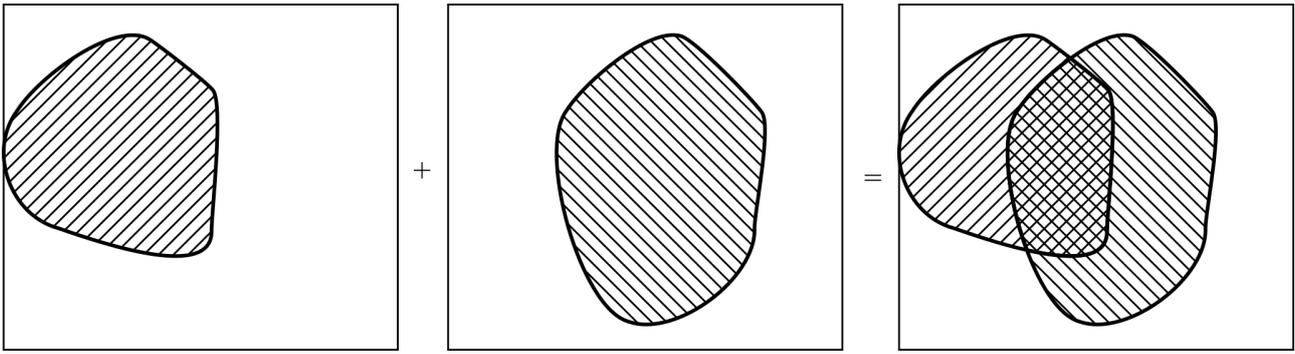


Рисунок 3 – Принцип выделения области пересечения накладываемых зон опасности (двойная штриховка характеризует усиление опасности)

В частности, при комбинированном воздействии ЭМИ в диапазоне 30 кГц...300 ГГц допустимое время пребывания в области пересечения цилиндрических зон опасности определяется для двух ситуаций: облучение от нескольких источников с одним значением ПДУ и облучение от нескольких источников с разными значениями ПДУ.

В первом случае полученные расчётные формулы для производственных условий имеют вид:

$$t_{\text{доп}} = 8 \cdot \left( \frac{E_{\text{ПДУ}}}{E_{\text{сумм}}} \right)^2, \quad (1)$$

где  $t_{\text{доп}}$  — допустимое время пребывания;

$E_{\text{ПДУ}}$  — предельно допустимое значение напряжённости электрического поля, В/м;

$E_{\text{сумм}}$  — суммарная напряжённость источников ЭМП:

$$E_{\text{сумм}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n E_i^2}, \quad (2)$$

где  $E_i$  — напряжённость электрического поля, создаваемая  $i$ -м источником ЭМП, В/м;

$n$  — количество источников ЭМП,

и

$$t_{\text{доп}} = 8 \cdot \frac{\text{ППЭ}_{\text{ПДУ}}}{\sum_{i=1}^n \text{ППЭ}_i}, \quad (3)$$

где  $\text{ППЭ}_i$  — плотность потока энергии, создаваемая  $i$ -м источником ЭМП, мкВт/см<sup>2</sup>;

$\text{ППЭ}_{\text{ПДУ}}$  — ПДУ плотности потока энергии нормируемого диапазона, мкВт/см<sup>2</sup>;

$n$  — количество источников ЭМП.

При облучении от нескольких источников с разными значениями ПДУ условием обеспечения безопасности в соответствии с СанПиН 2.2.41191-03 является:

$$\sum_{j=1}^m \left( \frac{E_{\text{сумм } j}}{E_{\text{ПДУ } j}} \right)^2 + \sum_{k=1}^q \frac{\text{ППЭ}_{\text{сумм } k}}{\text{ППЭ}_{\text{ПДУ } k}} \leq 1, \quad (4)$$

где  $E_{\text{сумм } j}$  — суммарная напряжённость электрического поля, создаваемая источниками ЭМП  $j$ -го нормируемого диапазона, определяемая по формуле (2), В/м;

$E_{\text{ПДУ } j}$  — ПДУ напряжённости электрического поля  $j$ -го нормируемого диапазона, В/м;

$\text{ППЭ}_{\text{сумм } k}$  — суммарная плотность потока энергии, создаваемая источниками ЭМП  $k$ -го нормируемого диапазона, мкВт/см<sup>2</sup>;

$\text{ППЭ}_{\text{ПДУ } k}$  — ПДУ плотности потока энергии  $k$ -го нормируемого диапазона, мкВт/см<sup>2</sup>;

$m$  — количество диапазонов, для которых нормируется  $E$ ;

$q$  — количество диапазонов, для которых нормируется ППЭ.

Условие (4) не позволяет определить допустимое время пребывания, поэтому разработаны два возможных подхода к решению этой задачи, первый из которых основан на использовании метода последовательных итераций, а второй реализует расчёт по следующему выражению:

$$t_{\text{доп}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^m \frac{E_{\text{сумм } j}^2}{\text{ЭЭ}_{Ej}} + \sum_{k=1}^q \frac{\text{ППЭ}_{\text{сумм } k}}{\text{ЭЭ}_{\text{ППЭ}j}}}, \quad (5)$$

где  $E_{\text{сумм } j}$  — суммарная напряжённость электрического поля, создаваемая источниками ЭМП  $j$ -го нормируемого диапазона, В/м;

$E_{\text{ПДУ } j}$  — ПДУ напряжённости электрического поля  $j$ -го нормируемого диапазона, В/м;

$\text{ППЭ}_{\text{сумм } k}$  — суммарная плотность потока энергии, создаваемая источниками ЭМП  $k$ -го нормируемого диапазона, мкВт/см<sup>2</sup>;

$\text{ППЭ}_{\text{ПДУ } k}$  — ПДУ плотности потока энергии  $k$ -го нормируемого диапазона, мкВт/см<sup>2</sup>;

$m$  — количество диапазонов, для которых нормируется  $E$ ;

$q$  — количество диапазонов, для которых нормируется ППЭ.

Картину опасности электромагнитного излучения, представляющую собой зоны допустимого времени пребывания в помещении, целесообразно представлять в виде проекции на план помещения. Для этого может использоваться как точечное, так и цилиндрическое проецирование. В последнем случае опасная зона рассматривается в виде цилиндра диаметром, соответствующим рабочему пространству, например, 1 м.

Реализация цилиндрического способа проецирования показана на рисунке 4.

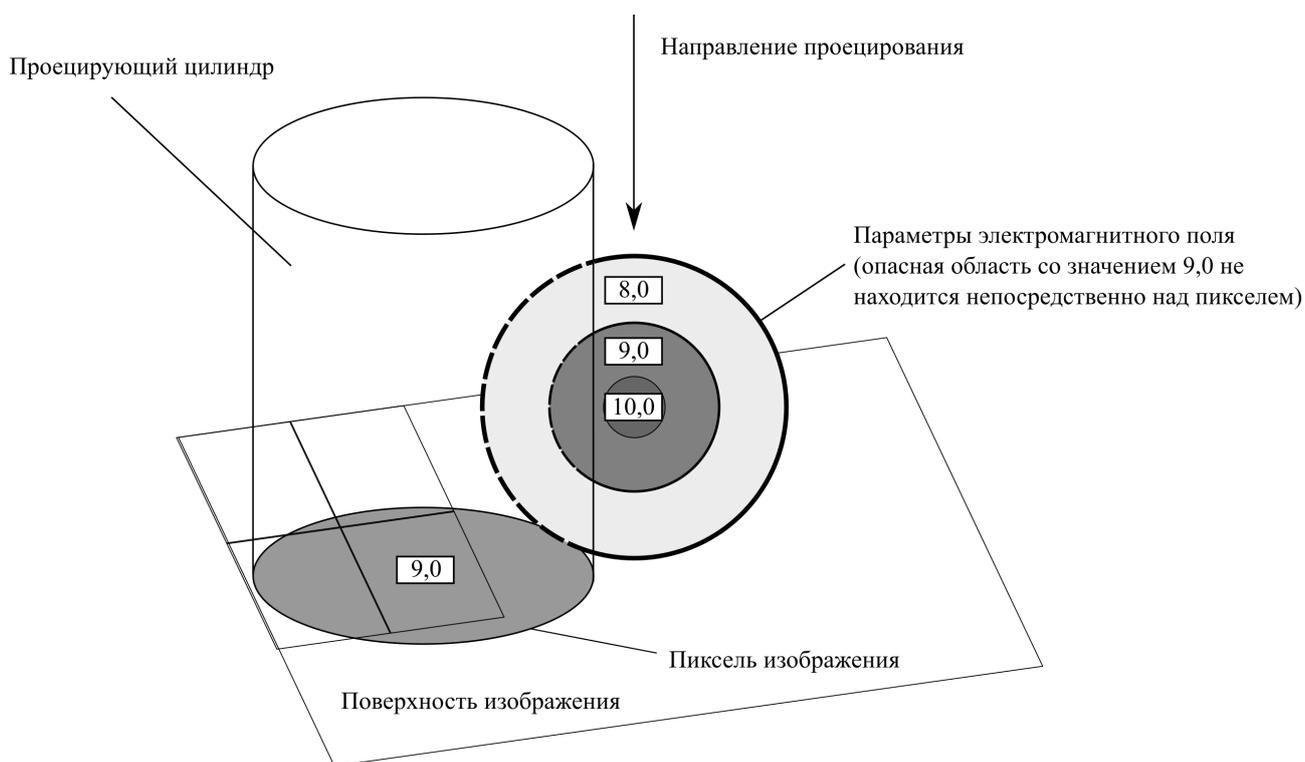


Рисунок 4 – Реализация цилиндрического способа проецирования при построении картины опасности

Если в обследуемом помещении одновременно действуют источники ЭМИ на нескольких частотах, то для получения итоговой картины опасности необходимо комбинировать картины, полученные для каждой составляющей ЭМП. При этом используется способ построения наложенной картины опасности, основанный на выделении области пересечения накладываемых зон влияния источников ЭМИ (рисунок 3).

**В третьей главе «Принципы реализации автоматизированной системы многочастотного контроля опасности электромагнитных излучений»** рассмотрена аппаратная реализация системы многочастотного контроля опасности электромагнитных излучений в виде технологического модуля с соответствующим программным обеспечением, а также представлена методика оценки состояния электромагнитной обстановки.

Аппаратная часть технологического модуля (рисунок 5) состоит из комплекса измерительных устройств, подключенных к ПК. Технические характеристики модуля приведены в таблице 1.

Автоматизация измерений и централизованная обработка данных позволяют по результатам компьютерного моделирования визуализировать пространственное распределение электромагнитного поля на частотах до 300 ГГц и сформировать картины опасности ЭМИ при раздельном и совокупном влиянии.

Программное обеспечение включает пакеты специализированных программ для: автоматизации измерений параметров ЭМП; построения трёхмерной модели помещения с источниками ЭМИ; моделирования параметров ЭМП

с применением средств моделирования openEMS и MEEP; анализа результатов моделирования и построения точечных и цилиндрических картин опасности.

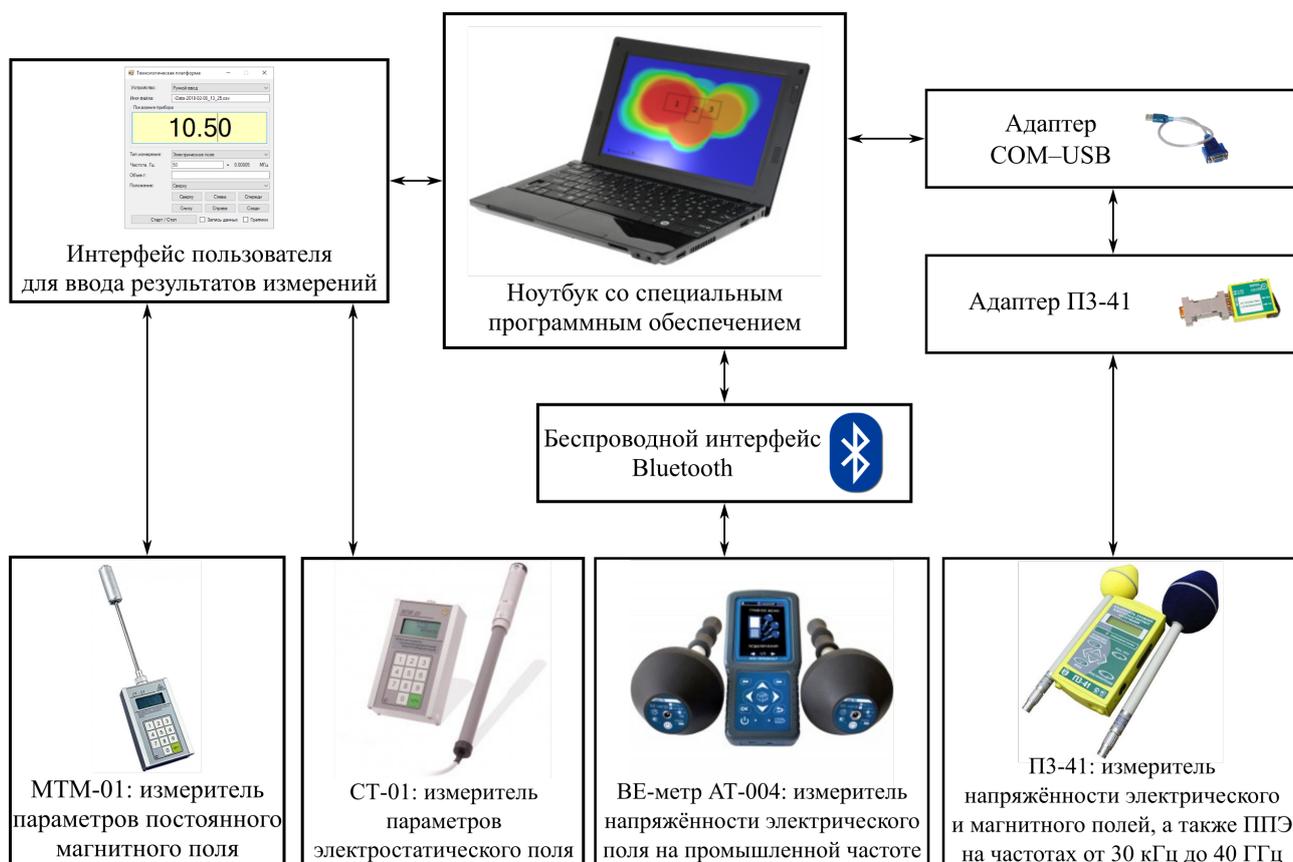


Рисунок 5 – Базовая модификация технологического модуля

Измеренные данные сохраняются в базе данных технологического модуля, а также выводятся на экран ПК.

Для построения трёхмерной модели помещения с источниками ЭМИ разработана программа, дополняющая стороннюю программу AppCSXCAD. Результатом работы программы является файл, который содержит в себе как трёхмерную модель, так и данные об измеренных параметрах ЭМП на моделируемой частоте.

Программа моделирования параметров ЭМП, разработанная в составе технологического модуля, использует известные программные пакеты для выполнения расчётов методом конечных разностей во временной области: openEMS и MEEP, которые являются взаимозаменяемыми. Для этого разработаны средства интеграции технологического модуля с обоими пакетами моделирования. Выходными данными моделирования являются мгновенные значения напряжённости электрического и/или магнитного полей в различных точках объёма помещения с шагом в 0,05 м. Эти данные используются для построения точечных и цилиндрических картин опасности с помощью разработанной программы.

Методика, реализующая предложенный подход к оценке состояния электромагнитной обстановки, включает следующие этапы.

Таблица 1 – Техническая характеристика технологического модуля

Контролируемый параметр	Диапазон частот	Диапазон измерения	Предел погрешности
Напряжённость электростатического поля $E$ , кВ/м	0 Гц	от 0,3 до 180 кВ/м	$\pm 15\%$
Напряжённость постоянного магнитного поля $H$ , А/м	0 Гц	от $\pm 0,5$ до $\pm 200$ А/м	до $\pm 20\%$
Напряжённость электрического поля $E$ , В/м	от 45 до 55 Гц	от 5 до 1000 В/м	$\pm 15\%$
ППЭ, мкВт/см <sup>2</sup>	от 0,3 до 40 ГГц	от 0,26 до 100000 мкВт/см <sup>2</sup>	$\pm 2,7$ дБ
Напряжённость электрического поля $E$ , В/м	от 0,03 до 300 МГц	от 0,5 до 300 В/м	$\pm 2,7$ дБ
Напряжённость магнитного поля $H$ , А/м	от 0,03 до 50 МГц	от 0,05 до 8 А/м	$\pm 2,7$ дБ

1. По результатам измерения геометрических параметров помещения, линейных размеров и взаимного расположения источников ЭМИ строится компьютерная трёхмерная модель помещения с источниками излучения. При этом каждый объект на плане представляется в форме параллелепипеда.

2. Проводится анализ спектра частот, присутствующих в помещении, с помощью анализатора спектра АКС-1201. По результатам анализа выбираются те диапазоны частот и составляющие ЭМП значения которых превышают 20 % от ПДУ, определяемых нормативными документами.

3. Проводится измерение значений контролируемых параметров ЭМП (напряжённостей электрического и магнитного полей, плотности потока энергии) в нормируемых диапазонах частоты (0 Гц, 50 Гц, 30 кГц...300 ГГц), включая поддиапазоны 30 кГц...3 МГц; 3 МГц...30 МГц; 30 МГц...50 МГц; 50 МГц...300 МГц, а также, при необходимости, на более высоких частотах, на расстояниях от каждой внешней поверхности каждого источника излучения, соответствующих требованиям санитарно-эпидемиологических правил и нормативов. При этом для каждой грани каждого обследуемого источника ЭМИ учитывают только наибольшие из измеренных значений.

4. По каждому из выбранных значений измеренных параметров ЭМП для соответствующих диапазонов частоты осуществляют компьютерное моделирование, в результате которого получают набор пространственных картин ЭМП в помещении по контролируемым составляющим.

5. Каждая из полученных пространственных картин ЭМП по контролируемым составляющим используется для формирования точечной и (или) цилиндрической картины опасности.

6. На основании анализа картин опасности выявляются области помещения с наложенными зонами ЭМИ.

7. Для областей помещения с отсутствием наложенных зон полученные карты опасности используют для обоснования защитных мероприятий с учётом частотных диапазонов.

8. Для пространства помещения с наложенными зонами ЭМИ формируют картины опасности, учитывающие усиление результирующего действия ЭМИ.

9. Полученные картины опасности с уточнёнными значениями допустимого времени пребывания в зонах комплексного воздействия ЭМИ используются для обоснования защитных мероприятий с учётом частотного диапазона каждой из контролируемых составляющих.

10. После проведения защитных мероприятий проводится повторный анализ параметров ЭМП в помещении с целью установления эффективности проведённых мероприятий.

**В четвёртой главе «Экспериментальная проверка и социально-экономическая оценка использования технологического модуля»** представлены результаты оценки адекватности компьютерных моделей ЭМП, а также возможностей и социально-экономических показателей технологического модуля при контроле электромагнитной обстановки для выбора защитных мероприятий.

Для оценки адекватности используемых компьютерных моделей проведены исследования параметров ЭМП, генерируемого СВЧ-печью Samsung DE68-03673D. По результатам анализа спектра излучений обследуемого объекта, повышенную степень опасности показали частоты 30 кГц и 300 МГц. Степень адекватности моделирования оценивалась по результатам сравнения значений параметров ЭМП, полученных в результате моделирования, с измеренными значениями этих параметров по критерию допустимой погрешности:

$$\max |\varepsilon_i| \leq \varepsilon_{\text{доп}}, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_i$  — допущенная относительная погрешность (максимум берётся по всем контрольным точкам);

$\varepsilon_{\text{доп}}$  — предельная допустимая относительная погрешность.

На рисунке 6 приведены данные по результатам экспериментов и моделирования в пакете МЕЕР для частоты 300 МГц.

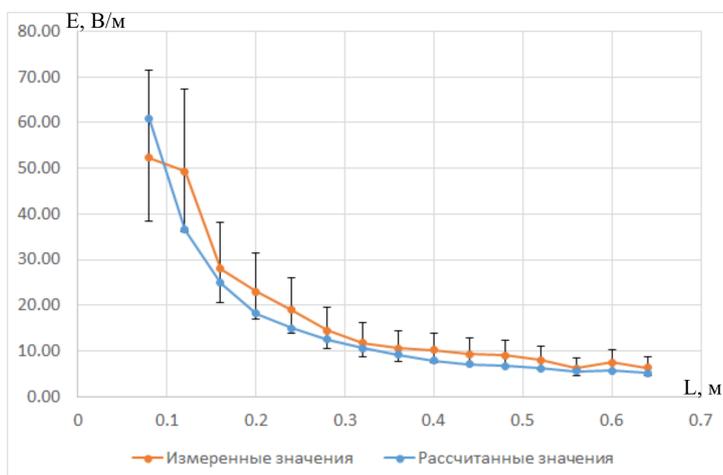


Рисунок 6 – Измеренные и рассчитанные значения напряжённости электрического поля на частоте 300 МГц, в зависимости от расстояния от корпуса СВЧ-печи (размер вертикальных отрезков соответствует диапазону погрешности прибора в контрольных точках)

Установлено, что технологический модуль с использованием обоих поддерживаемых способов моделирования (openEMS и MEEP) обеспечивает достаточную для практического применения адекватность моделирования параметров ЭМП.



Рисунок 7 – Опытная СВЧ-установка для обработки зерна:  
1 — блок подачи зерна;  
2 — рабочая камера;  
3 — выходной блок

Апробация технологического модуля проводилась при исследовании параметров ЭМИ, создаваемых опытной СВЧ-установкой для предпосевной обработки семян, разработанной в Красноярском государственном аграрном университете (рисунок 7).

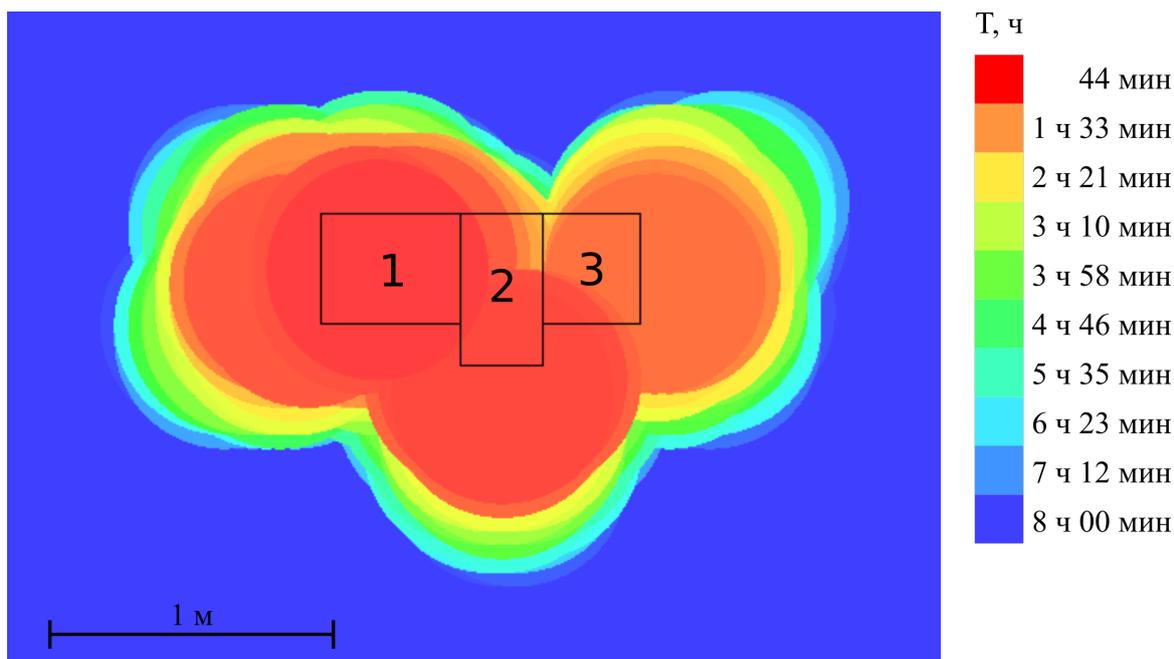


Рисунок 8 – Цилиндрическая картина опасности ЭМИ на частоте 2450 МГц

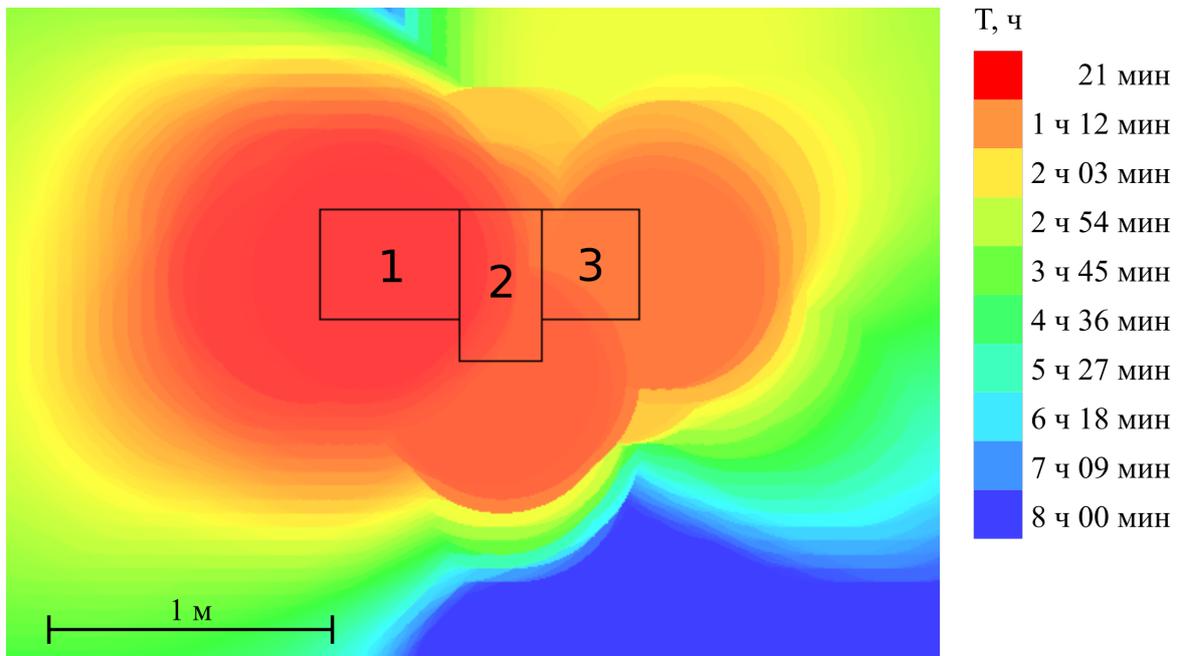


Рисунок 9 – Комбинированная цилиндрическая картина опасности ЭМИ на частотах 2450 МГц и 30 кГц

По результатам моделирования построены точечные и цилиндрические картины опасности для каждой отдельной частоты, а также комбинированные картины опасности. На рисунке 8 представлена цилиндрическая картина опасности на частоте 2450 МГц, а на рисунке 9 — комбинированная картина, учитывающая увеличение уровня опасности при наложении составляющей электрического поля на частоте 30 кГц.

Учёт совместного действия различных составляющих ЭМП (напряжённости электрического поля на частоте 30 кГц и плотности потока энергии ЭМИ на частоте 2450 МГц) позволяет получить более достоверную картину опасности по сравнению с индивидуальными картинами, построенными для отдельных составляющих ЭМП. В данном случае минимально допустимое время пребывания возле установки сокращается с 44 минут при воздействии ЭМИ только на частоте 2450 МГц до 21 минуты при совместном влиянии составляющей 30 кГц.

С учётом выявленных опасных составляющих ЭМП выполнено экранирование установки защитной алюминиевой сеткой с шагом 5 мм, которой были закрыты все технологические отверстия установки, а также основной излучающий СВЧ-блок, после чего повторно проведены измерения и моделирование параметров ЭМП.

В результате существенно снижен максимальный уровень опасности: время допустимого пребывания увеличилось с 21 мин до 1 ч. Кроме того, сокращена область повышенной опасности возле установки. По итогам измерений сделан вывод об увеличении времени допустимого пребывания в наиболее опасных зонах помещения почти в 3 раза, что подтверждает эффективность проведённого мероприятия.

Таким образом, разработанный технологический модуль позволяет производить оперативную оценку электромагнитной обстановки на объектах с источниками ЭМИ и принимать обоснованные защитные меры.

При этом социальный эффект от его использования обусловлен возможностью быстрой и объективной оценки электромагнитной обстановки, позволяющей своевременно принять необходимые защитные меры и тем самым снизить опасность для здоровья людей, а экономический эффект определяется многократным сокращением трудоёмкости и времени проведения измерений и составляет около 23000 руб. при обследовании помещения объёмом 40 м<sup>3</sup> (из расчёта 125 контрольных точек на 1 м<sup>3</sup>).

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. В современном агропромышленном комплексе используется большое количество разнообразных источников, генерирующих электромагнитные излучения в частотном диапазоне, начиная от статических электрических и магнитных полей и до СВЧ-излучений. При этом необходимая защита применяется не во всех случаях, несмотря на то, что соответствующие технологии обычно требуют постоянного присутствия персонала.

2. Оценка состояния электромагнитной обстановки может производиться с помощью картин опасности в виде карты допустимого времени пребывания человека в различных зонах исследуемого пространства, полученных по результатам ограниченного числа измерений и моделирования электромагнитного поля с учётом возможности одновременного влияния и усиления результирующего действия нескольких источников электромагнитного излучения.

3. Для многочастотного моделирования электромагнитного поля целесообразно использовать метод конечных разностей во временной области, позволяющий учитывать раздельное и совокупное влияние электромагнитных излучений при построении картин их опасности.

4. Формирование карты допустимого времени пребывания человека в различных зонах исследуемого пространства производится с использованием разработанных принципов построения точечных, цилиндрических, а также учитывающих усиление результирующего действия электромагнитных излучений комбинированных картин опасности.

5. Преобразование картин распределения параметров электрических, магнитных полей и плотности потока энергии, полученных в результате моделирования, в картины опасности может быть произведено по результатам выполненной систематизации методов определения допустимого времени пребывания в зоне действия электромагнитных излучений с учётом составляющих электромагнитного поля.

6. Техническую реализацию рассмотренных принципов оценки состояния электромагнитной обстановки представляет переносной технологический модуль, включающий взаимодополняющую совокупность измерительных приборов (СТ-01, МТМ-01, ПЗ-41, ВЕ-метр-АТ-004) для контроля составляющих

электромагнитного поля, объединённых с помощью аппаратных адаптеров в единую информационно-измерительную систему с выходом на персональный компьютер.

7. Функционирование технологического модуля обеспечивается пакетом разработанных специализированных программ по автоматизации измерений, построению трёхмерных моделей помещений с источниками электромагнитных излучений, моделированию электромагнитного поля, анализу результатов моделирования и формированию картин опасности.

8. Автоматизация измерений и централизованная обработка данных позволяют по результатам компьютерного моделирования оперативно визуализировать пространственное распределение электромагнитного поля на частотах 0 Гц, 50 Гц и в диапазоне 30 кГц...300 ГГц и формировать картины опасности электромагнитных излучений при отдельном и совокупном влиянии.

9. В процессе апробации технологического модуля подтверждена адекватность моделирования методом конечных разностей во временной области с применением средств моделирования openEMS и MEER и правомерность использования реализуемых компьютерных моделей, проверена возможность формирования точечных и цилиндрических картин опасности при отдельном и комбинированном воздействии электромагнитных излучений и подтверждено повышение степени опасности при комбинированном воздействии. В частности, допустимое время пребывания возле опытной СВЧ-установки в условиях воздействия электрического поля частотой 30 кГц и 2450 МГц при отдельном учёте составившее, соответственно, 30 мин и 44 мин, снижается до 21 мин за счет совокупного влияния.

10. Выбор мероприятий по обеспечению электромагнитной безопасности и оценка их эффективности производится по разработанной методике контроля с помощью технологического модуля. При этом социальный эффект от его использования обусловлен возможностью быстрой и объективной оценки электромагнитной обстановки, позволяющей своевременно принять необходимые защитные меры и тем самым снизить опасность для здоровья людей, а экономический эффект определяется многократным сокращением трудоемкости и времени проведения измерений и составляет около 23000 руб. при обследовании помещения объёмом 40 м<sup>3</sup>.

11. Перспективные направления дальнейших научных разработок по данной тематике включают развитие программного обеспечения для уменьшения времени моделирования, а также оснащение технологического модуля измерительной аппаратурой повышенной точности.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### В изданиях из перечня ВАК

1. Мигалёв, И. Е. Практическое применение метода конечных разностей во временной области к моделированию электромагнитного поля / И. Е. Мигалёв // Ползуновский вестник. — 2012. — № 4. — С. 33 – 35.
2. Мигалёв, И. Е. Способ представления картины опасности электромагнитной обстановки / И. Е. Мигалёв // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2012. — Т. 12 (98). — С. 97 – 101.
3. Титов, Е. В. Методика контроля электромагнитной обстановки на объектах АПК / Е. В. Титов, И. Е. Мигалёв // Вестник КрасГАУ. — 2012. — № 7. — С. 136 – 138.

### В изданиях из библиографической базы Scopus

4. Soshnikov, A. Principles of Functioning of Technological Module for Danger Estimation of Combined Electromagnetic Field / A. Soshnikov, I. Migalyov, E. Titov // 15th International scientific conference “Underground Urbanisation as a Prerequisite for Sustainable Development” 12-15 September 2016, St. Petersburg, Russia. — Vol. 165. — 2016. — P. 1027 – 1034. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816341765>.
5. Titov, E. The technology of electromagnetic radiation danger estimation using the hardware-software module / E. Titov, I. Migalyov // MATEC Web Conf. — 2017. — Vol. 102. — P. 01035. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710201035>.

### Патенты и свидетельства

6. Пат. 2631523. Российская Федерация МПК<sup>7</sup> H05K9/00, G2B17/02. Устройство для снижения опасности электромагнитных излучений / Е. В. Титов, А. А. Сошников, Л. Н. Нурбатырова, И. Е. Мигалёв; патентообладатель: ФГБОУ ВО «АлтГТУ». № 2016141802; заявл. 24.10.2016; опубл. 25.09.2017.
7. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013616142. Моделирование электромагнитного поля в помещении / И. Е. Мигалёв, А. А. Сошников, Н. П. Воробьёв, Е. В. Титов; правообладатель: ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И. И. Ползунова». Заявка № 2013613887; дата поступления 07.05.2013; зарегистр. 27.06.2013.
8. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016611619. Моделирование цилиндрической картины опасности электромагнитного излучения / И. Е. Мигалёв, А. А. Сошников, Е. В. Титов; правообладатель: ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И. И. Ползунова». Заявка № 2015662002; дата поступления 09.12.2015; зарегистр. 08.02.2016.
9. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015618850. Определение допустимого времени пребывания в электростатическом, переменных электрических, магнитных и электромагнитных полях / Е. В. Титов,

А. А. Сошников, Л. Н. Нурбатырова, Ю. А. Овечкина, **И. Е. Мигалёв**; правообладатель: ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И. И. Ползунова». Заявка № 2015615504; дата поступления 23.06.2015; зарегистр. 19.08.2015.

10. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017610984. Интеграция данных с измерителя параметров электромагнитного поля / **И. Е. Мигалёв**, Е. В. Титов, А. А. Сошников, Л. Н. Нурбатырова; правообладатель: ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И. И. Ползунова». Заявка № 201663017; дата поступления 30.11.2016; зарегистр. 19.01.2017.

11. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2015617900. Формирование картины опасности электромагнитной обстановки в зоне влияния нескольких источников электромагнитного излучения / К. А. Селиверстов, Е. В. Титов, А. А. Сошников, В. А. Чунихин, А. Э. Вагайцев, **И. Е. Мигалёв**, Л. Н. Нурбатырова, Ю. А. Овечкина; правообладатель: ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И. И. Ползунова». Заявка № 201614994; дата поступления 10.06.2015; зарегистр. 24.07.2015.

### Другие издания

12. **Мигалёв, И. Е.** Алгоритмические оптимизации, применяемые при формировании картины опасности электромагнитного поля / **И. Е. Мигалёв**, Е. В. Титов // Энерго- и ресурсосбережение — XXI век: материалы XIV-ой международной научно-практической конференции / под ред. применяемые при формировании картины опасности электромагнитного поля Алгоритмические оптимизации. — Орёл, ОГУ им. И.С. Тургенева, 2016. — С. 161 – 164. URL: <http://oreluniver.ru/science/confs/2016/ee/publ>.

13. **Мигалёв, И. Е.** Оптимизация алгоритма построения картины опасности электромагнитного поля / **И. Е. Мигалёв**, Е. В. Титов // Наука и молодежь-2016: Сборник материалов XIII-ой Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. — Секция «Электроэнергетика», подсекция «Электрификация производства и быта». — Барнаул, АлтГТУ, 2016. — С. 7 – 9. URL: [http://edu.secna.ru/media/f/epb\\_tez\\_2016.pdf](http://edu.secna.ru/media/f/epb_tez_2016.pdf).

14. Сошников, А. А. Мониторинг электромагнитных излучений на объектах АПК / А. А. Сошников, Е. В. Титов, **И. Е. Мигалёв** // Инновации в сельском хозяйстве: теоретический и научно-практический журнал Всероссийского научно-исследовательского института электрификации сельского хозяйства. — 2016. — № 2 (17). — С. 82 – 87.

15. Сошников, А. А. Оценка опасности электромагнитных излучений в технологических процессах АПК с учетом возможности комбинированного воздействия / А. А. Сошников, Е. В. Титов, **И. Е. Мигалёв** // Достижения науки и техники АПК. — 2017. — № 3 (31). — С. 72 – 75.

16. **Мигалёв, И. Е.** Проверка точности моделирования электромагнитного поля методом конечных разностей / **И. Е. Мигалёв**, Е. В. Титов, А. В. Сальников, А. Г. Караваев // Наука и молодежь-2016: Сборник материалов XIII-ой Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и

молодых ученых. — Секция «Электроэнергетика», подсекция «Электрификация производства и быта». — Барнаул, АлтГТУ, 2016. — С. 9 – 11. URL: [http://edu.secna.ru/media/f/epb\\_tez\\_2016.pdf](http://edu.secna.ru/media/f/epb_tez_2016.pdf).

17. **Мигалёв, И. Е.** Использование инструментария МЕЕР для моделирования электромагнитного поля / **И. Е. Мигалёв, Е. В. Титов** // Электронный научный журнал «Горизонты образования», вып. 19, 2017, XIV Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь». — Барнаул, АлтГТУ, 2017. — С. 32 – 35.

18. Титов, Е. В. Исследование электромагнитной безопасности мониторов персональных компьютеров / Е. В. Титов, **И. Е. Мигалёв, А. С. Клепиков** // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи: сборник материалов II-ой всероссийской студенческой конференции (с международным участием). — Челябинск, 2011. — С. 267 – 268.

19. Титов, Е. В. Исследование электромагнитного излучения, создаваемого компактными люминесцентными лампами / Е. В. Титов, **И. Е. Мигалёв.** — Энерго- и ресурсосбережение – XXI век.: Сборник материалов X-ой международной научно-практической конференции / Под редакцией д.т.н., проф. В.А. Голенкова, д.т.н., проф. А.Н. Качанова, д.т.н., проф. Ю.С., Степанова. — Орел, Госуниверситет-УНПК, 2012. — С. 181 – 183.

20. Титов, Е. В. Исследование уровней магнитного поля в помещениях АлтГТУ / Е. В. Титов, **И. Е. Мигалёв, В. К. Синицын** // Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодёжь». — Барнаул, 2014. — С. 27 – 28.

21. Сошников, А. А. Оценка безопасности помещений с несколькими источниками электромагнитного излучения / А. А. Сошников, Е. В. Титов, **И. Е. Мигалёв.** — Энерго- и ресурсосбережение – XXI век.: Сборник материалов IX-ой международной научно-практической конференции / Под редакцией д.т.н., проф. В.А. Голенкова, д.т.н., проф. А.Н. Качанова, д.т.н., проф. Ю.С., Степанова. — Орёл, ОРЛИК и К, 2011. — С. 11 – 14.

22. Титов, Е. В. Концепция исследования электромагнитных излучений от бытовых электроприборов / Е. В. Титов, **И. Е. Мигалёв.** — Проблемы техноферной безопасности – 2015: сборник статей I Международной заочной научно-практической конференции (10 февраля 2015 года) / Под ред. Мельберт А.А., Вишняк М.Н. — Барнаул, Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова: Изд-во АлтГТУ, 2015. — С. 171 – 175.

23. Мониторинг электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики и создание системы защиты на основе современных информационных технологий: отчёт о НИР / Некоммерческое партнерство по развитию международных исследований и проектов в области энергетики «Глобальная энергия»; рук. Сошников А. А.; исполн. Титов Е. В., **Мигалёв И. Е.** — Барнаул, 2016. — 57 с. — № гранта МГ-2015/04/2.