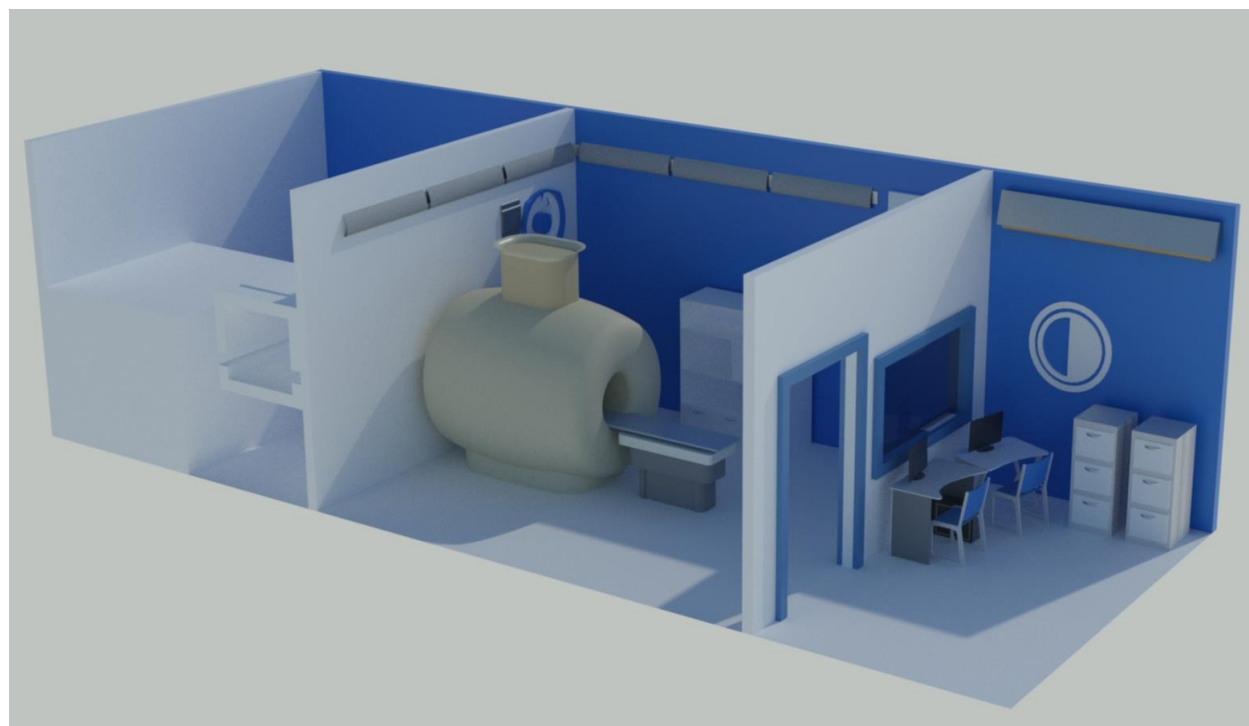




ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МАКЕТ КАБИНЕТА МРТ ДЛЯ УЧЕБНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЦЕЛЕЙ



Тамбов
◆ Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ» ◆
2026

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический университет»**

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МАКЕТ КАБИНЕТА МРТ ДЛЯ УЧЕБНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЦЕЛЕЙ

Утверждено Ученым советом
ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»
в качестве методических указаний для студентов 1 – 6 курсов
направлений подготовки бакалавров 12.03.04 и магистрантов 12.04.04
«Биотехнические системы и технологии» всех форм обучения

Учебное электронное издание



Тамбов

◆ Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ» ◆

2026

УДК 616-053.32
ББК 3844-06я73-5
Ф94

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры
«Компьютерно-интегрированные системы
в машиностроении» ФГБОУ ВО «ТГТУ»
С. В. Карпушкин

Ф94 **Функциональный** макет кабинета МРТ для учебных и экспериментальных целей [Электронный ресурс] : методические указания / сост. : С. В. Фролов, Т. А. Фролова. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2026. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium IV ; RAM 512 Мб ; необходимое место на HDD 1,9 Мб ; Windows 7/8/10/11 ; дисковод CD-ROM ; мышь. – Загл. с экрана.

Обеспечивают формирование необходимых компетенций для осуществления поиска, критического анализа и синтеза информации, применения системного подхода для решения поставленных задач; способности к подготовке технических требований и заданий на проектирование и конструирование биотехнических систем; создания интегрированных биотехнических систем и комплексов для решения сложных задач мониторинга здоровья человека.

Предназначены для студентов 1 – 6 курсов направлений подготовки бакалавров 12.03.04 и магистрантов 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии» всех форм обучения.

УДК 616-053.32
ББК 3844-06я73-5

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Незаконное копирование и использование данного продукта запрещено.*

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2026

ВВЕДЕНИЕ

В современной биологии и медицине широко используются различные приборы, аппараты и комплексы, способствующие нормализации состояния биологического объекта, управлению физиологическими функциями организма в условиях патологии и при экстремальных нагрузках и получению информации о состоянии объекта в момент исследования. Технические средства исследования биообъектов базируются на основных законах их функционирования, теоретических и практических основах и методологии управления с учетом инженерно-психологических аспектов взаимодействия человека с техническими компонентами.

Управление каким-либо объектом – это процесс воздействия на него с целью обеспечения сохранения определенной структуры, требуемого течения процессов в объекте или требуемого изменения его состояния и реализации заданных программ и целей. Теория управления базируется на получении и обработке информации о состоянии объекта и внешних условиях его работы, которая используется для выработки воздействия, прикладываемого к объекту и обеспечивающего достижение цели управления. Причем, являясь динамическим процессом, целенаправленное управление может осуществляться только при знании основных характеристик всех компонентов системы управления, независимо от их природы.

Сложность протекания процессов управления и необходимость повышения их производительности и точности связана с широким применением автоматизированных и автоматических систем управления, анализ и синтез которых требуют точного математического описания как всей системы в целом, так и ее отдельных элементов, проведения оценки устойчивости систем и прогнозирования их работы в статическом и динамическом режимах. Кроме этого, многомерность современных систем автоматического управления, взаимное влияние многих параметров на выходную величину предполагают выбор из множества возможных показателей оптимального, путем решения оптимизационных задач, направленных на удовлетворение многочисленных и противоречивых требований, предъявляемых к системам. Поэтому не менее

важным становится и процесс оптимизации управляющих решений, как в технических системах медицинского назначения, так и при управлении здравоохранением в целом.

Основная проблема заключается в том, что для получения каких-либо практических навыков в области МРТ требуется работа с реальным оборудованием, но в связи с его сложностью и недостаточной квалификацией студента это недопустимо, дабы не привести к необратимым последствиям.

Инициативной группой студентов конструкторского бюро кафедры Биомедицинская техника был создан функциональный макет кабинета МРТ для учебных и экспериментальных целей. Стоит отметить, что он является настоящим прототипом реального кабинета МРТ в масштабе 1:15, в котором предусмотрены все основные требования по проектировке, а также встроена интеллектуальная система мониторинга микроклимата.

Основной особенностью кабинета МРТ является большое влияние аппарата на микроклимат в помещении сканирования, а также самого климата на результаты диагностики. Дело в том, что аппарат выделяет большое количество тепла по причине своей высокой мощности и особенностей устройства. Это, в свою очередь, дает нестабильные показатели температуры и влажности в помещении сканирования. Следовательно, поддержание климата в кабинете МРТ является сложной инженерной задачей, ошибки которой могут привести к серьезным последствиям, например, к сбою в работе аппарата и квенчу – потери сверхпроводящих свойств магнита и аварийному выбросу гелия.

Студенты конструкторского бюро «БМТ», занимающиеся научной работой в данной области, могут использовать модель кабинета МРТ для создания алгоритмов, новых технических решений, тестирования датчиков и других элементов. Преподаватели кафедры могут интегрировать модель в учебный процесс для лучшего усвоения материала по теме «Особенности проектирования кабинета МРТ».

Поэтому студенты нашей кафедры реализовали функциональный макет кабинета МРТ для учебных и экспериментальных целей.

1. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОГО ТОМОГРАФА

Магнитно-резонансная томография (МРТ) – это метод лучевой диагностики, который использует магнитное поле и радиоволны для создания детальных изображений органов и тканей внутри тела. МРТ позволяет получить послойные и объемные изображения, которые восстанавливаются с помощью математических методов. Принцип работы МРТ основан на измерении различий в плотности тканей и скорости восстановления ядер после их возбуждения радиочастотным импульсом. Пациент помещается внутрь специального аппарата, который создает сильное магнитное поле вокруг него. Затем, с помощью радиоволн, ядра в тканях возбуждаются и излучают сигналы, которые затем регистрируются и обрабатываются компьютером.

Томограф представляет собой туннелеобразную конструкцию, внутри которой установлена подвижная кушетка, на которую помещают пациента (рис. 1).



Рис. 1. Аппарат МРТ

МРТ может быть выполнена на аппаратах открытого или закрытого типа. Аппараты открытого типа позволяют пациенту проходить исследование в положении сидя или стоя, что может быть удобным для людей с физическими ограничениями или страхом перед закрытыми пространствами. Принцип работы МРТ при этом не меняется, и специалист управляет устройством дистанционно.

МРТ является одним из самых сложных и дорогостоящих методов лучевой диагностики. Он обладает высокой разрешающей способностью и позволяет получить детальные изображения внутренних органов и тканей, что делает его незаменимым инструментом для диагностики различных заболеваний и планирования лечения.

МРТ работает на основе своей конструкции, которая включает в себя мощный магнит, представляющий собой туннель. Во время работы в нем создается магнитное поле, оно взаимодействует с элементарными частицами в теле человека (рис. 2).

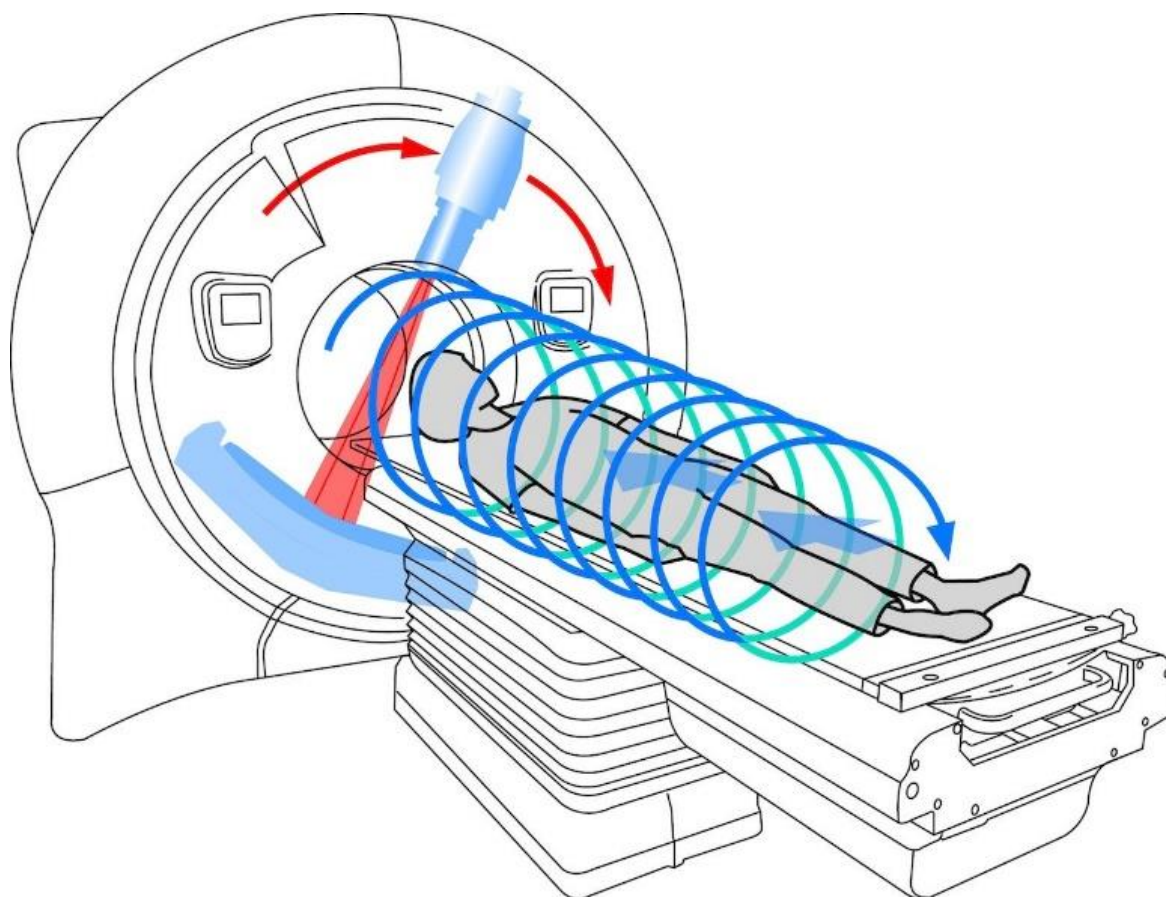


Рис. 2. Взаимодействие с телом человека

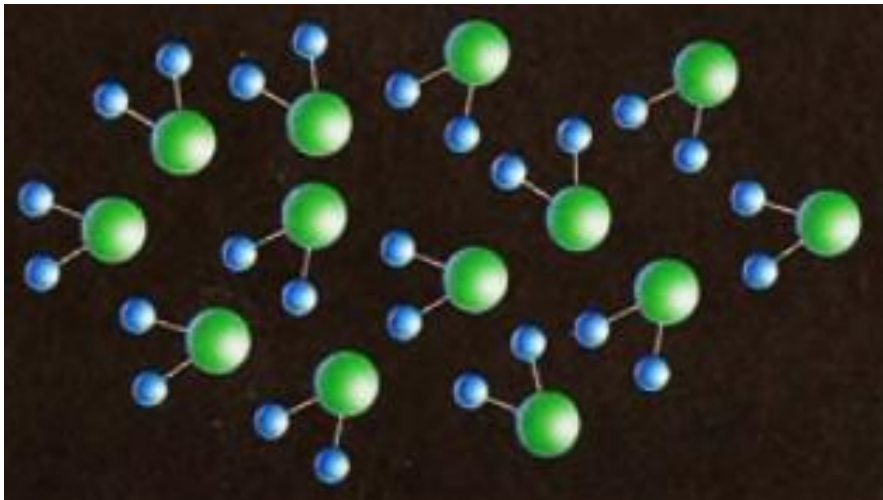


Рис. 3. Молекулы воды (кислород – зеленого цвета, водород – синего)

Если быть более точным, можно вспомнить, что молекулы воды образованы одним атомом кислорода и двумя атомами водорода (рис. 3).

У каждого атома есть ядро, которое содержит протоны и нейтроны, а вокруг ядра находятся электроны, движущиеся по определенным орбитам. Для получения МР-изображения используются импульсы, которые излучает ядро атома водорода, состоящее из одного протона.

Протоны обладают свойством, которое называется спин (англ. вращение). Его можно представить как некий фактор, заставляющий протон вращаться вокруг собственной оси и вести себя наподобие небольшого двухполюсного магнита (рис. 4).

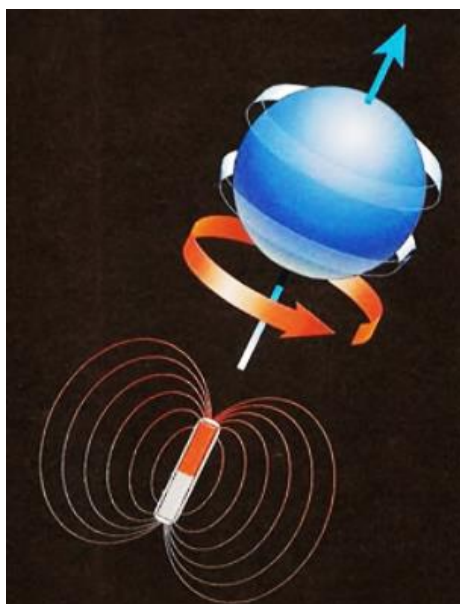


Рис. 4. Спин

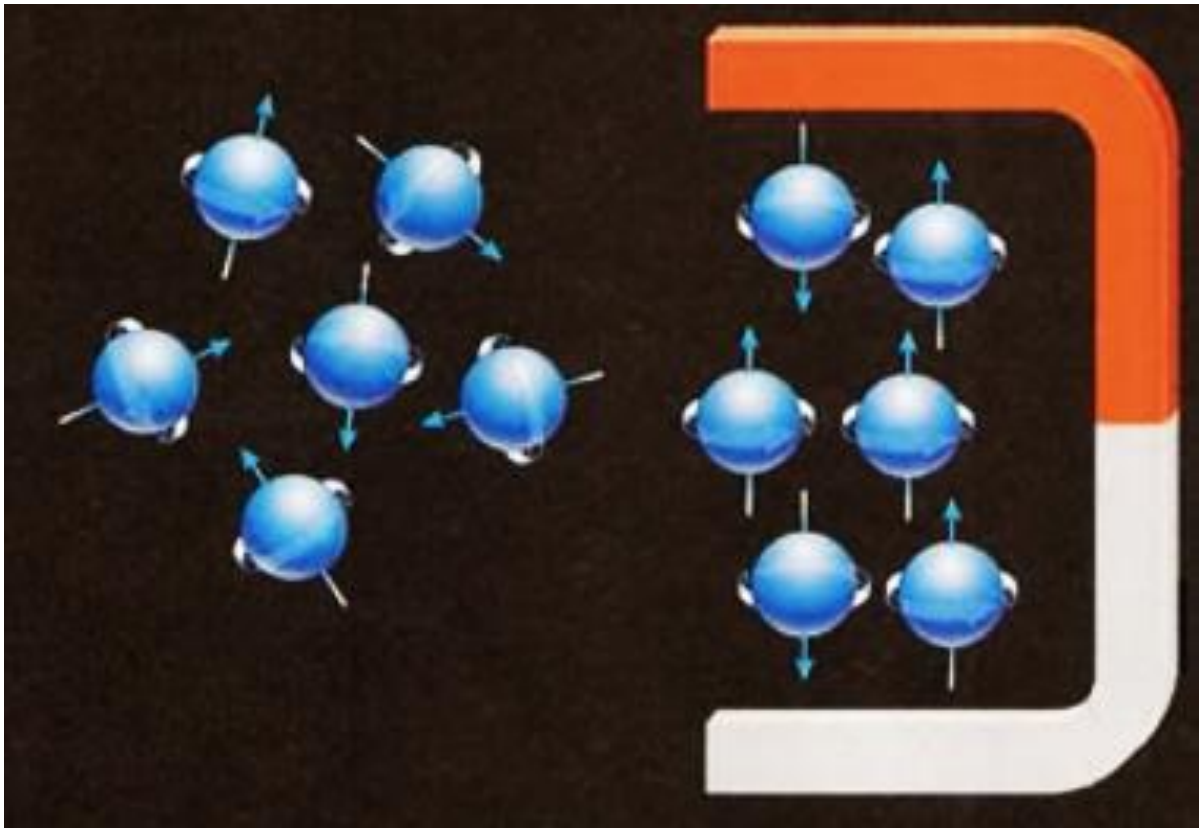


Рис. 5. Направление протонов

Ось вращения в магнитном поле может быть выровнена вдоль силовых линий или против них, аналогично притяжению или отталкиванию полюсов реальных магнитов.

На практике большинство (хотя и незначительное) протонов ориентировано по направлению силовых линий магнитного поля (рис. 5).

Применение радиоволнового пучка в МРТ нарушает равновесие в тканях. Когда излучение прекращается, протоны возвращаются в свое исходное состояние, которое зависит от типа ткани. В этот момент они излучают энергетические импульсы, которые регистрируются МР-томографом. Исходя из этих данных, создается томограмма.

Высокая частота импульсов позволяет получать изображения тончайших «срезов» любого органа или структуры (рис. 6). Благодаря работе МРТ-томографа становится возможным отследить самые незначительные нарушения кровотока, структуры, размера, строения органов и других параметров работы организма.

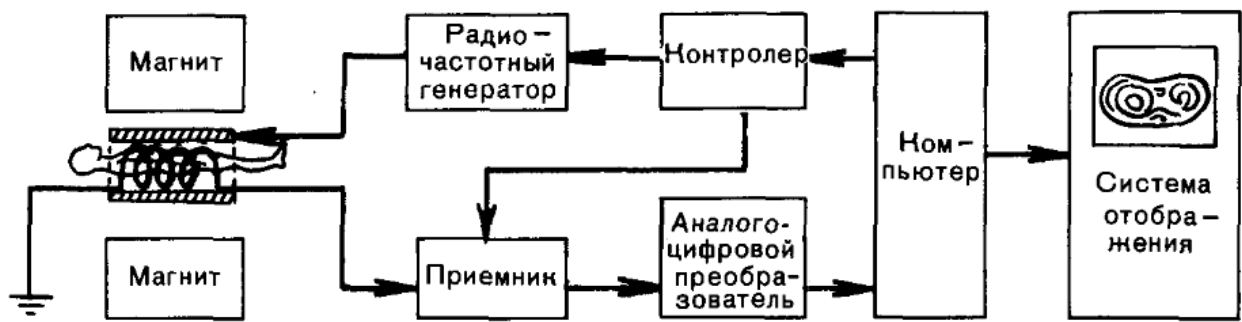


Рис. 6. Получение изображения

Накопленные клинические данные, полученные за более чем полувека использования МРТ, позволяют с высокой точностью интерпретировать характеристики изображения, и выявлять патологии, которые невозможно определить с помощью других методов диагностики.

2. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ С МРТ

2.1. КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОЙ СРЕДЫ

Для проверки однородности статического поля, уровня индукции постоянного магнитного поля, уровня излучения электронно-вычислительной машины и эффективности экранирования используются различные параметры и приборы. Например, магнитометры, такие как эрстедметры, градиентометры, коэрцитиметры и мю-метры, используются для измерения различных характеристик магнитного поля. Универсальные магнитометры объединяют несколько функций этих приборов.

Контроль проводится путем измерения магнитной индукции или напряженности магнитного поля на рабочих местах, в рабочей зоне, а также в местах пребывания пациентов и персонала.

Для измерения уровня излучения электронно-вычислительной машины используются параметры, такие как напряженность электрического поля, плотность магнитного потока и напряженность электростатического поля на рабочих местах.

Оценка эффективности экранирования проводится при монтаже системы. Для этого в специально предназначенном помещении устанавливают клетку Фарадея, обеспечивающую однородность поля внутри нее. Измерения проводятся с использованием генератора высокочастотных колебаний, помещенного вне клетки, и оценивается его влияние на магнитное поле внутри клетки.

2.2. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

Для проверки качества изображения в медицинской визуализации используются специальные эталонные фантомы. Эти фантомы представляют собой обычно кубические или цилиндрические тела, заполненные парафином или другими материалами. Они позволяют моделировать движение жидкости и оценивать качество визуализации при использовании различных методик.

Фантомы используются для контроля таких параметров, как сигнал/шум, однородность изображения, пространственное разрешение, искажение и толщина среза. Эти параметры являются важными для достоверности и точности получаемых изображений.

Процедура контроля проводится следующим образом: фантом используется в качестве объекта исследования, а его параметры известны заранее. Затем оцениваются различные неточности и отклонения от известных параметров. Если обнаруживаются неполадки или несоответствия, их можно вовремя устранить, чтобы обеспечить высокое качество визуализации.

Таким образом, использование эталонных фантомов позволяет контролировать и оценивать качество изображения в медицинской визуализации, а также выявлять и устранять возможные неполадки. Это важный шаг для обеспечения точности и достоверности получаемых результатов

2.3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И БЕСПЕРЕБОЙНОГО ПИТАНИЯ СИСТЕМЫ

Для обеспечения корректной работы медицинского томографа необходимо обеспечить определенные параметры окружающей среды в помещении, где находится установка. Эти параметры включают в себя температуру, влажность воздуха и атмосферное давление. Температура должна быть поддерживаема в диапазоне 22 ± 4 °C. Если температура выходит за этот диапазон, это может привести к неточностям и отклонениям в работе МРТ. Кроме того, неправильная температура может вызвать дискомфорт как у персонала, так и у пациента. Влажность воздуха также играет важную роль. Она должна быть поддерживаема на уровне 70%. Если влажность слишком низкая или слишком высокая, это может повлиять на работу МРТ и вызвать дискомфорт у персонала и пациента. Атмосферное давление также должно быть в определенном диапазоне от 60 до 106 кПа. Отклонения от этого диапазона могут негативно сказаться на работе МРТ и вызвать проблемы.

Для обеспечения бесперебойного питания системы используются источники бесперебойного питания (ИБП). Они имеют две основные задачи: поддерживать постоянное напряжение для нормальной работы томографа и защищать оборудование от возможных проблем в электросети, таких как скачки напряжения, провалы, помехи и искажения.

ИБП представляют собой аккумуляторы, которые заряжаются от сети и поставляют энергию на установку в случае отключения электросети. Они поддерживают напряжение магнитного поля в томографе в течение определенного времени, чтобы избежать сброса гелия. Это важно, так как заправка гелием является дорогостоящей процедурой, а выход гелия под высоким давлением может быть опасен для пациента.

Проверка системы охлаждения сверхпроводящих магнитов.

Для поддержания сверхпроводимости магнита используется охлаждение жидким гелием, которое происходит при температуре $-268,9$ °С. Однако, гелий имеет свойство испаряться при взаимодействии с окружающей средой. Чтобы контролировать количество гелия, используется уровнемер. Основным элементом уровнемера является сверхпроводник, который находится внутри колбы с жидким гелием. Сопротивление сверхпроводника зависит от того, какая часть проводника погружена в жидкий гелий, а какая часть находится в газообразном состоянии гелия.

3. КВЕНЧ

В некоторых ситуациях возможно такое нежелательное и опасное явление, как квенч (quench). Это переход магнита из сверхпроводящего состояния в несверхпроводящее, сопровождающееся превращением энергии, запасенной в магните, в тепло. При этом участок проводника может нагреться всего на 5–6 градусов, но это влечет следующие последствия:

- гелий, охлаждающий этот участок, переходит из жидкой фазы в газообразную. Появляется паровой пузырь, по объему в 700 раз превосходящий локальную зону перегрева;

- пузырь вытесняет теплоноситель. Остальные участки проводника оказываются без охлаждения и сами начинают нагреваться, теряя свойство сверхпроводимости;

- процесс приобретает лавинообразный характер. Сопротивление проводника резко начинает подчиняться закону Ома;

- ток нагревает проводник с выделением большого количества тепла. Температура проводника может достигать почти температуры плавления;

- гелий, став газообразным, увеличивает свое давление в сотни раз. На практике это нередко приводит к его взрыву и выбросу.

Описанная нештатная ситуация может вывести из строя дорогостоящее томографическое оборудование, стать серьезным фактором риска жизни и здоровья находящихся рядом людей.

Для появления квенча достаточно, чтобы участок сверхпроводника порядка миллиметра вышел из сверхпроводящего состояния. Для этого нужно приложить энергию не менее 10 мДж. Такой потенциальной энергией обладает тело массой 0,1 г, поднятое на 1 см над поверхностью земли, т.е. падения швейной иглы с высоты 1 см на обмотку магнита достаточно для того, чтобы вызвать квенч.

«Спусковым крючком» для квенча могут послужить следующие причины:

- нажатие кнопки аварийного вывода поля;
- падение уровня гелия ниже критического;
- неисправность (или подключение посторонних потребителей) в цепь заземления МРТ;
- нестабильность магнита;
- полная закупорка сервисной горловины;
- посторонние тела, попавшие на обмотку магнита (кусочек льда или изоляции).

Современные МРТ-сканеры имеют значительную защиту от негативного воздействия и автоматически отключаются при наступлении критических значений. Но это не является абсолютной гарантией от возникновения квенча, его причины не всегда удастся установить даже после экспертного анализа аварийной ситуации.

Стоит перечислить профилактические меры, позволяющие снизить вероятность квенча до минимума:

- кабинеты МРТ должны содержаться в идеальном состоянии;
- нужно проводить контроль совместимости магнитного оборудования и соблюдения зональности;
- допуск к томографам должны иметь только обученные сотрудники;
- специалисты для плановой дозаправки аппаратов МРТ должны вызываться строго в соответствии с графиком технического обслуживания;
- оптимальный уровень снижения жидкого гелия для дозаправки магнитно-резонансных томографов – 20...30%. Более высокие значения сигнализируют о критическом падении хладагента в аппарате.

При проверке томографа нужно не только восполнить уровень жидкого гелия, но и провести профилактические и ремонтные работы, позволяющие продлить срок службы медтехники. Обслуживание криосистемы, помимо всего прочего, предполагает замену криоголовки и адсорбера в компрессоре, промывку или замену линий, контроль уровня масла и др.

Если квенч уже произошел, необходимо:

- эвакуировать из кабинета пациентов и персонал;
- дождаться завершения опасного процесса и не пытаться повлиять на него – это бессмысленно;
- стабилизировать давление в криостате, для чего нужно отогреть клапаны сброса жидкого гелия;
- провести замену поврежденной мембраны;
- устранить все прочие неисправности, выполнить проверку магнитно-резонансного аппарата;
- заправить аппарат гелием и повторно ввести его в эксплуатацию.

При профессиональном подходе аварийная ситуация не скажется на работе томографа и его можно эффективно и безопасно использовать многие годы.

4. ТЕОРИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ В БИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

4.1. ПОНЯТИЕ И ОСОБЕННОСТИ БИОТЕХНИЧЕСКИХ И МЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ

В последние десятилетия произошло объединение ученых и специалистов в области точных и биологических наук для разработки общей теории систем, включающей в себя технические и биологические элементы. Это объединение стало необходимым для решения задач, связанных с этими науками и возникающих на их стыке. В настоящее время уже накоплены достаточные знания о структуре и функционировании живого организма, а также разработана необходимая техническая база для проведения биотехнических исследований, которые имеют как биологический, так и технический характер. Однако такое направление невозможно без преобразования биологических объектов и создания их искусственных аналогов. Поэтому основой синтеза биотехнических систем является бионическая методология, которая предполагает изучение особенностей строения и функционирования живого организма, необходимых для решения конкретных задач синтеза систем определенного назначения.

Биотехнические системы имеют широкую область применения, включая системы эргатического типа, где человек играет роль управляющего звена, а также технические системы, управляющие состоянием организма человека и популяциями живых организмов. Они отличаются многообразием параметров и сложной связью между ними, а также влиянием внутренних и внешних изменений на исследуемые объекты и системы. Но несмотря на различия в функционировании этих систем, для всех них важным является принцип адекватности согласования управленческих характеристик технических и биологических элементов системы, а также принцип идентификации информационной среды. Последний требует оптимизации потоков и формы предъявления информации, которой обмениваются технические и биологические элементы. Кроме того, синтез технической части системы должен учи-

тывать морфологические и психофизиологические особенности связанной с ней биологической подсистемы. Проблема разработки биотехнических систем отражает важный аспект научно-технического прогресса – объединение и сотрудничество между учеными и специалистами в области точных и биологических наук. Биотехническая система (БТС) представляет собой особый тип комплексных систем, состоящих из биологических и технических элементов, которые взаимодействуют в рамках единого управляющего контура. При этом технические элементы должны быть разработаны таким образом, чтобы максимально содействовать взаимодействию с биологическими элементами. БТС включает в себя биологические и технические подсистемы, которые объединены прямыми и обратными связями и общими алгоритмами управления (рис. 7)

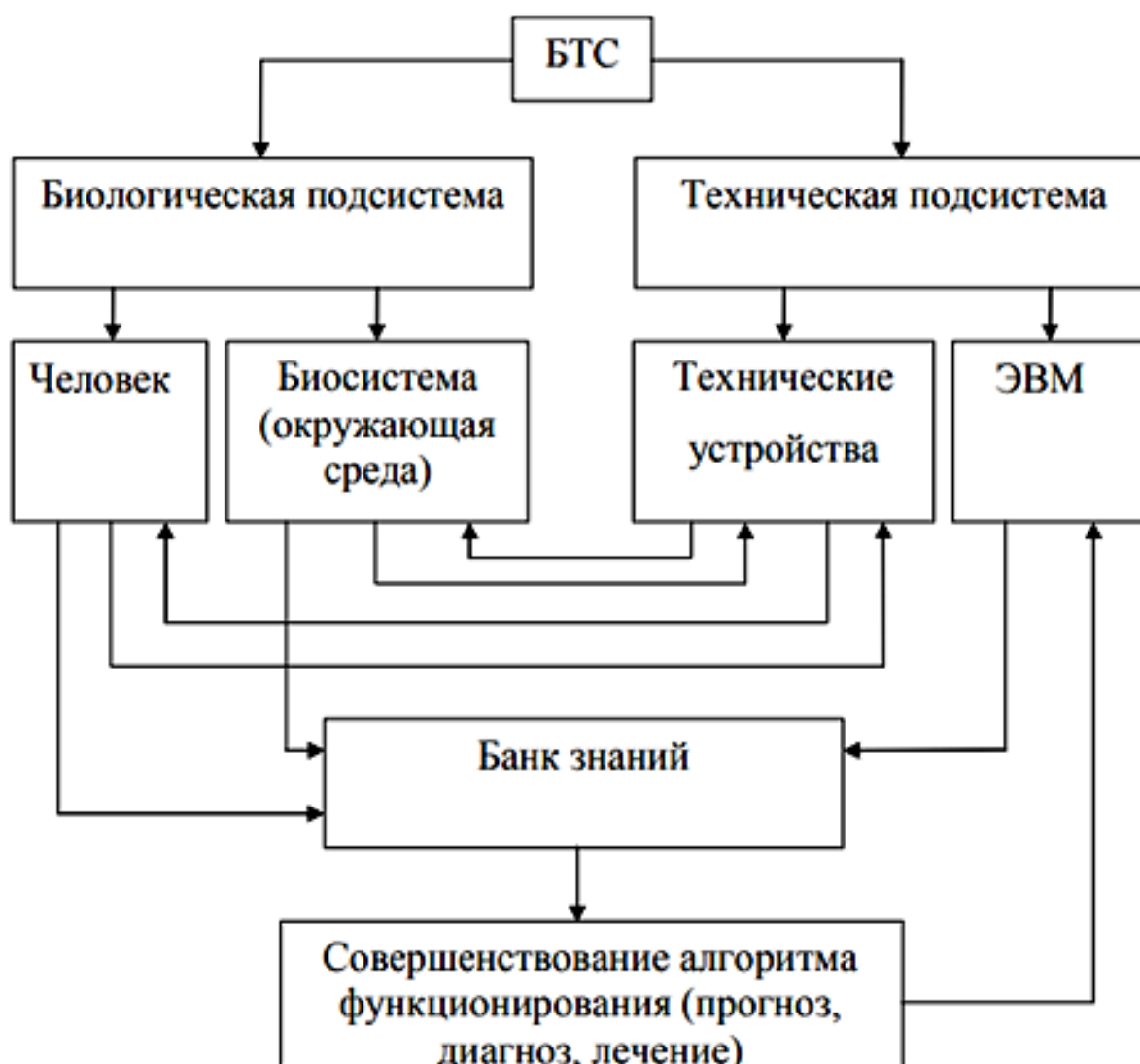


Рис. 7. Схема биотехнической системы

Биологическая подсистема характеризуется сложной структурой и функциональностью. Все ее параметры изменяются с различными скоростями. Однако, важнейшей особенностью этой подсистемы является гомеостаз, то есть способность поддерживать определенные количественные показатели важных параметров независимо от внешних воздействий.

В организме существует согласованное взаимодействие различных подсистем, которые реагируют на различные виды возмущений, такие как химические, энергетические и информационные. Реакция организма на каждый вид возмущений характеризуется различными постоянными времени, которые варьируются от сотых долей секунд до нескольких часов, суток или даже месяцев.

Биологическая подсистема представляет собой сложноорганизованную структуру с множеством входов и выходов. Процессы в этой подсистеме протекают с различной скоростью, а выходными параметрами могут быть концентрация веществ и их изменение в различных физиологических системах, уровень и изменение энергетических показателей, а также различные показатели поведенческих реакций.

Для измерения и контроля этих параметров используется техническая подсистема, а корректировка их значений может быть осуществлена с помощью медикаментозных и других методов воздействия.

Объектом исследования в биотехнической системе может выступать человек или функциональные системы его организма, а также другие живые организмы. Техническая подсистема включает различные устройства и комплексы, в основном компьютеры, и требует разработки сложных алгоритмов для ее управления.

Техническая подсистема имеет свои особенности. Она может иметь разный уровень сложности, и устройства технической подсистемы могут влиять на функционирование любой части биотехнической системы. Вмешательство технической подсистемы может быть разным, в зависимости

от цели биотехнической системы. В большинстве случаев вмешательство заключается в информационном воздействии, где техническая подсистема отправляет сигналы, влияющие на изменение состояния нервных механизмов (психоэмоциональное воздействие). Также возможно физическое воздействие, такое как нагрузка, температура, лазерное, радиобиологическое и другие воздействия. В лечебных биотехнических системах также возможно вмешательство на уровне обмена веществ, где внешним управляющим сигналом является вещество, действующее в течение нескольких минут или часов.

Биотехнические системы могут быть системами, в которых человек выполняет роль управляющего звена (системы эргатического типа), а также системами, где технические устройства управляют организмом человека (например, искусственное дыхание, кровообращение) или целыми популяциями живых организмов (например, системы принудительного управления поведением животных). Биотехнические системы сочетают положительные качества технических и биологических систем, компенсируя их недостатки. Однако различная природа сочетаемых систем делает важным выбор режимов функционирования технической части системы и использование конструктивных решений, которые максимально соответствуют морфологическим и психофизиологическим особенностям биологических объектов системы.

4.2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА BIOTEХНИЧЕСКИХ И МЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ

Основным свойством биотехнической системы (БТС) является ее способность к адаптации. Эта способность осуществляется через два контура адаптации: внешний и внутренний. Внешний контур позволяет БТС выполнять свою целевую функцию в условиях изменяющихся внешних факторов. Внутренний контур позволяет элементам БТС взаимно адаптироваться

к изменению состояния друг друга, вызванного как внешними, так и внутренними факторами. Биологические звенья в БТС придают системе пластичность и улучшают ее адаптивные характеристики во внешнем контуре адаптации. Однако качество внутренней адаптации зависит от возможностей технических элементов системы следить за изменением состояния биологических звеньев и изменять свои характеристики в соответствии с этими изменениями. При анализе биообъекта как элемента БТС необходимо учитывать параметры взаимодействующих с ним физических полей, таких как лазерное излучение. Эти параметры не должны превышать физиологический диапазон, чтобы избежать необратимых изменений или патологических состояний.

Свойства БТС реализуются через принципы сопряжения биологической и технической подсистем в единой функциональной системе. Принцип адекватности требует согласования конструктивных параметров и управленческих характеристик биологических и технических элементов. Принцип единства информационной среды требует согласования свойств информационных потоков между техническими и биологическими элементами.

Биотехнические системы представляют собой сложные системы из-за сложности организма, несовершенства методов исследования и математического аппарата. Поэтому такие системы должны анализироваться с позиции системного подхода, учитывая их целостность и механизмы, обеспечивающие их функционирование.

При исследовании биообъекта оптимальные параметры лазерного воздействия подбираются на основе известных данных о взаимодействии лазерного излучения с биотканью и основных эффектах. Связь между параметрами технической системы, биологической системы и внешней среды определяет возможность оптимизации и управления воздействием.

Неэффективность воздействия на биообъект может быть обусловлена различными реакциями объекта, которые могут быть предусмотрены или не предусмотрены, но происходят в соответствии с известными законами, или неизвестны их зависимости от воздействия.

4.3. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

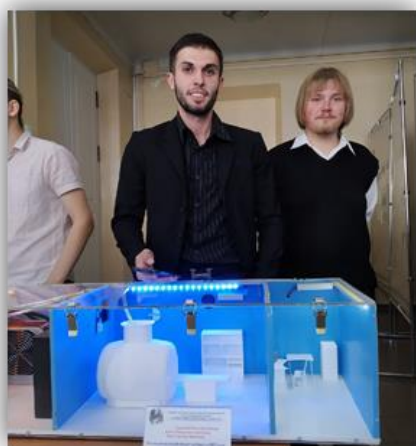
Биотехнические системы относятся к группе больших или очень сложных систем, которые невозможно точно и подробно описать. Однако, для сравнительного анализа различных систем, биологические системы могут быть описаны в терминах технических наук. Для этого используются функциональные характеристики систем, такие как эффективность, надежность, качество управления, помехозащищенность, устойчивость и степень сложности.

Количественные характеристики могут быть получены экспериментально или аналитически при точном математическом описании системы. Однако, они должны удовлетворять определенным условиям: они должны зависеть от процесса функционирования системы, быть легко вычисляемыми или измеряемыми, давать наглядное и сопоставимое представление об одном из свойств системы, и допускать простую приближенную оценку на основе экспериментальных данных.

5. МАКЕТ КАБИНЕТА МРТ ДЛЯ УЧЕБНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЦЕЛЕЙ

5.1. ОПИСАНИЕ МАКЕТА

Инициативной группой студентов конструкторского бюро кафедры Биомедицинская техника был создан функциональный макет кабинета МРТ для учебных и экспериментальных целей. Стоит отметить, что он является настоящим прототипом реального кабинета МРТ в масштабе 1:15, в котором предусмотрены все основные требования по проектировке, а также встроена интеллектуальная система мониторинга микроклимата, а также встроена интеллектуальная система мониторинга микроклимата.



Для реализации макета было необходимо провести анализ требований и ГОСТов по проектированию кабинетов МРТ, что позволит сохранить все действительные соотношения при его создании. Далее, построить компьютерную модель на основе этих данных для внесения корректировок и подготовки к проектированию и 3D-печати. В данном случае использовалась программная среда Autocad (рис. 8).

Как и реальный кабинет, он включает 3 основных помещения (рис. 9): техническую комнату, комнату сканирования, где расположен сам аппарат и операторскую, где врач следит за проведением диагностики.

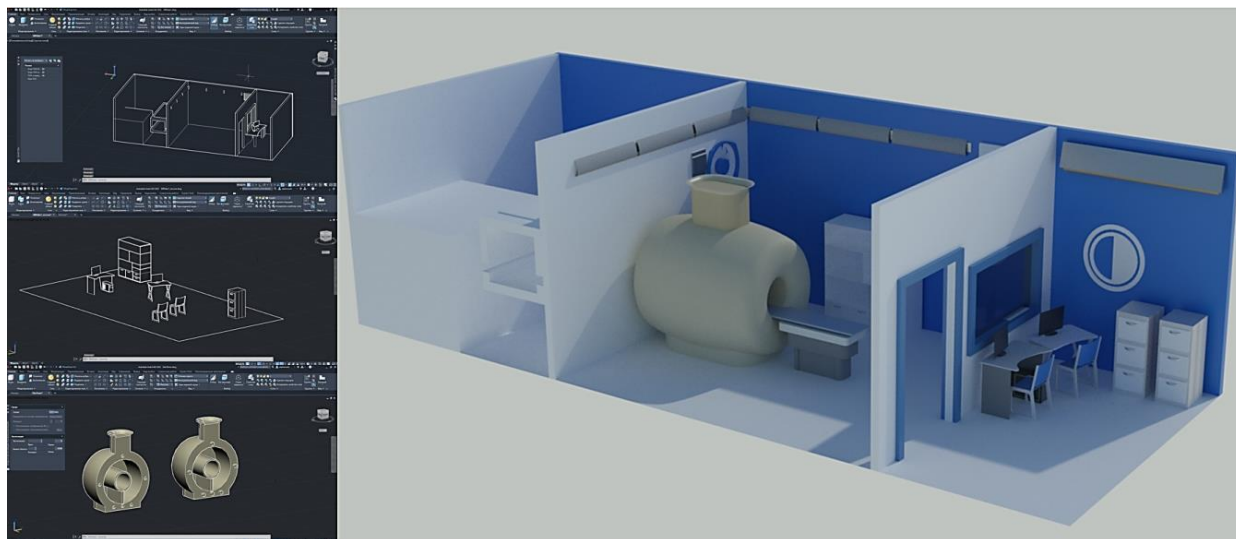


Рис. 8. Компьютерная модель макета кабинета МРТ

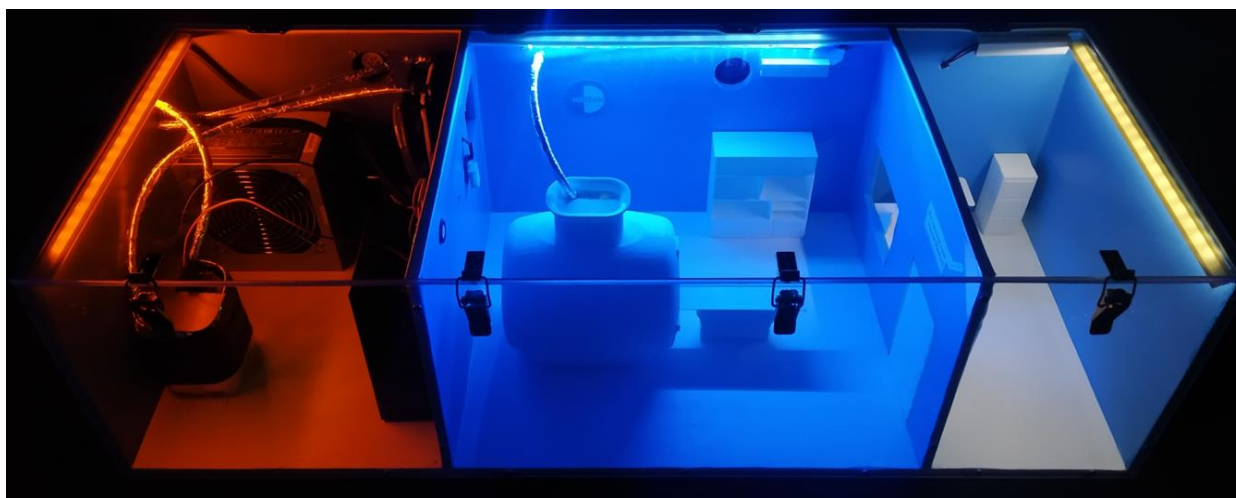


Рис. 9. Демонстрация решения

За основу аппарата выбрана модель Филипс Ачива (Achieva 1,5T), размер и формы которой вызвали затруднения при печати. До оптимизации модели расчетное время печати составляло 53 часа, но после проведения оптимизации итоговое время было в районе 25 часов.

Слева на рис. 10 показана техническая комната, включающая в себя все перечисленные ранее элементы поддержки показателей микроклимата помещения сканирования. В центре – блок управления, в который встроен дисплей, выводящий значения температуры и влажности. Справа – созданное приложение для дистанционного контроля системы, где в реальном времени выводятся изменения показателей на графиках, можно вводить пределы допустимых значений, которые будут автоматически поддерживаться в макете и производить перезапуск системы в случае сбоев в работе.

На рисунке 11 показана комната оператора, то есть врача с рабочим местом, а также предупреждающая табличка на двери, которая содержит ряд противопоказаний для входа в помещение с магнитно-резонансным томографом и проведения обследования.

Комната сканирования (рис. 12) помимо аппарата включает датчик температуры и влажности DHT22, датчик концентрации кислорода и шкафчик для хранения радиочастотных катушек МРТ.



Рис. 10. Техническая комната

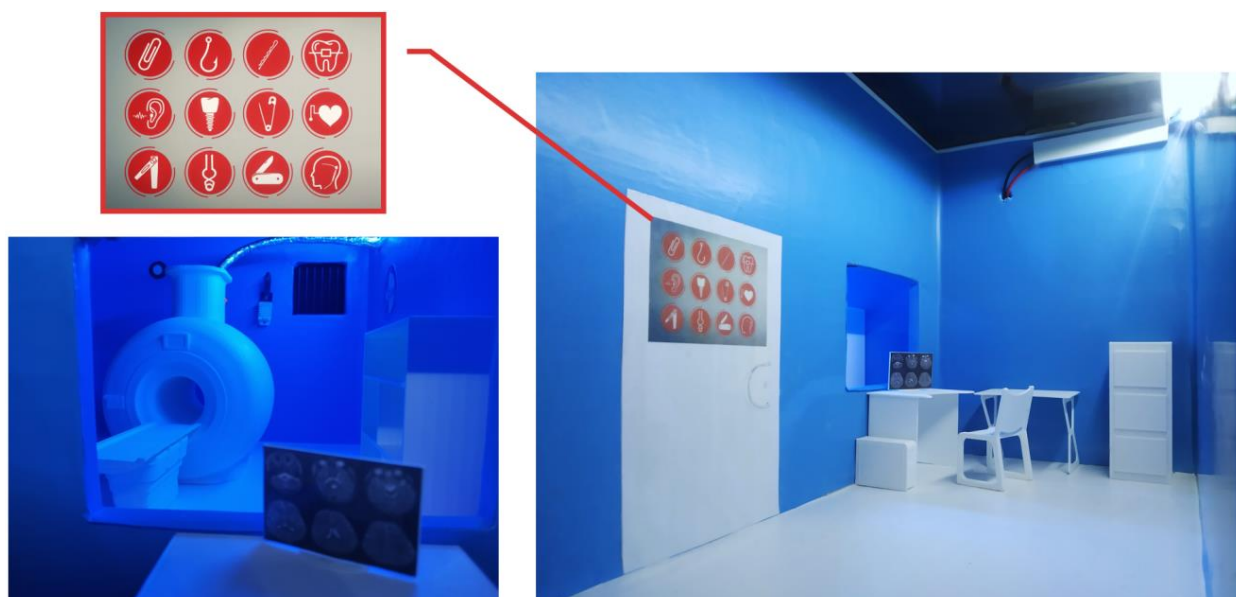


Рис. 11. Комната оператора



Рис. 12. Комната сканирования

Циркуляция воздуха происходит при помощи вентиляторов на вдув и на выдув. На стене показано, что под внешним слоем установлена клетка Фарадея (это оболочка, используемая для блокирования электромагнитных полей) для экранирования от электромагнитного поля, а на двери присутствует защитная рамка металлодетектора для предотвращения серьезных последствий и нанесения вреда здоровью пациента.

5.2. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Основной особенностью кабинета МРТ является большое влияние аппарата на микроклимат в помещении сканирования, а также самого климата на результаты диагностики. Дело в том, что аппарат выделяет большое количество тепла вследствие своей высокой мощности и особенностей устройства. Это, в свою очередь, дает нестабильные показатели температуры и влажности помещения. Поэтому, поддержание климата в кабинете МРТ является сложной инженерной задачей, ошибки которой могут привести к серьезным последствиям, например, к сбою в работе аппарата, явлению потери сверхпроводящих свойств магнита и аварийному выбросу гелия.

Для проработки этих вопросов в макете была реализована система автоматической поддержки показателей микроклимата (температуры и влажности) в помещении сканирования.

На рисунке 13 приведено оборудование, которое используется в кабинете МРТ для поддержания микроклимата и имитирующие их элементы в макете. Чиллер производит охлаждение компонентов, систем в кабинете МРТ, в том числе жидкости в кондиционируемом контуре с фанкойлом. Фанкойл или центральный кондиционер – это устройство рециркуляции воздуха.



Рис. 13. Чиллер и фанкойл

С помощью приведенных элементов регулируется влажность и температура помещения в пределах рекомендуемой Министерством здравоохранения и СанПин нормы: температура помещения не должна превышать 24 °С при минимальных 20 °С, а относительная влажность воздуха должна составлять от 40 до 60%.

Для предотвращения аварийной ситуации, вызванной квенчем (внезапная утрата магнитом сверхпроводимости), можно использовать датчик кислорода (рис. 14). Установив его в помещении сканирования на уровне потолка и считывая с него данные, можно зафиксировать выброс гелия из аппарата в атмосферу, так как он будет вытеснять кислород. При изменении показателя концентрации кислорода должно прийти оповещение инженеру, обслуживающему данную систему для своевременного реагирования, а также персоналу для приостановки проведения обследований во избежание опасности.

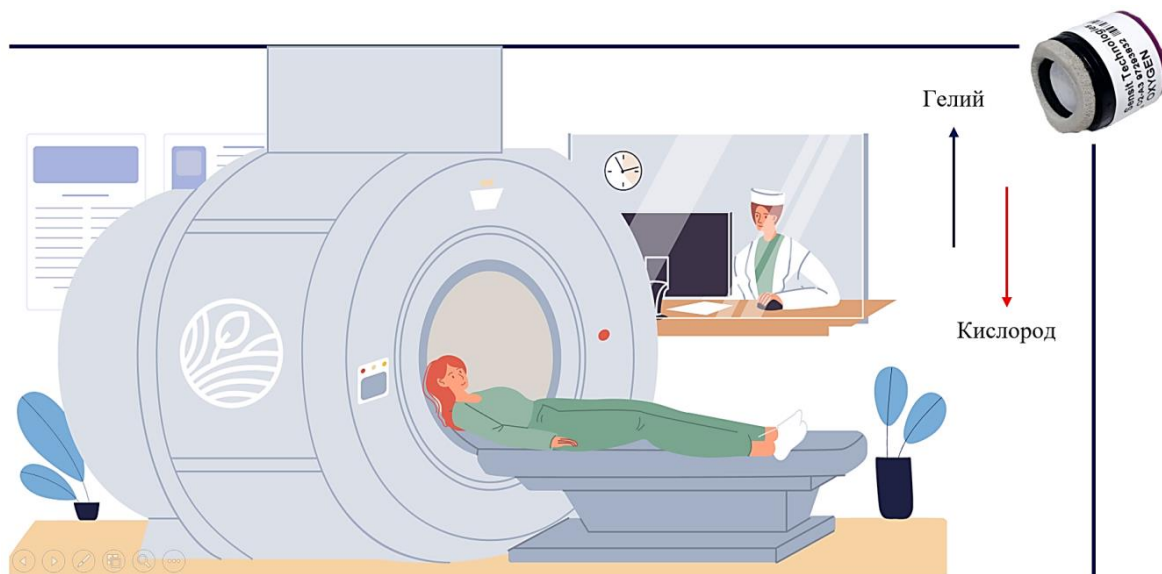


Рис. 14. Датчик кислорода

5.3. МОДЕЛЬ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ

Инженер медицинской организации, обслуживающий аппарат МРТ и вспомогательные системы, имеет потребность в дистанционном контроле микроклимата в кабинете МРТ, а также в управлении определенными пара-

метрами в случае необходимости или возникновения аварийной ситуации, но не может в силу недостаточной функциональности решений, представленных на рынке. К таким недостаткам можно отнести отсутствие возможности удаленного: перезапуска системы, перехода на резервный источник питания/водоснабжения, изменения значений температуры и влажности.

В связи с этим возникает потребность в моделировании интеллектуальной системы управления параметрами микроклимата в кабинете МРТ в рамках макета для разработки необходимых алгоритмов решения проблемы. Принципиальная схема данной системы представлена на рис. 15.

Она состоит из управляющего устройства, включающего плату ардуино на базе микроконтроллера Atmega328 и модуль из 4 реле, датчики температуры, относительной влажности воздуха и концентрации кислорода, а также устройство вывода информации на дисплей, связующую часть с внешним устройством управления, исполнительные элементы и блок питания, соответственно, для питания всех элементов схемы.

С помощью алгоритма на плате Arduino и подключенного к ней модуля реле происходит автоматическое регулирование параметров температуры и влажности на основе показаний датчиков.

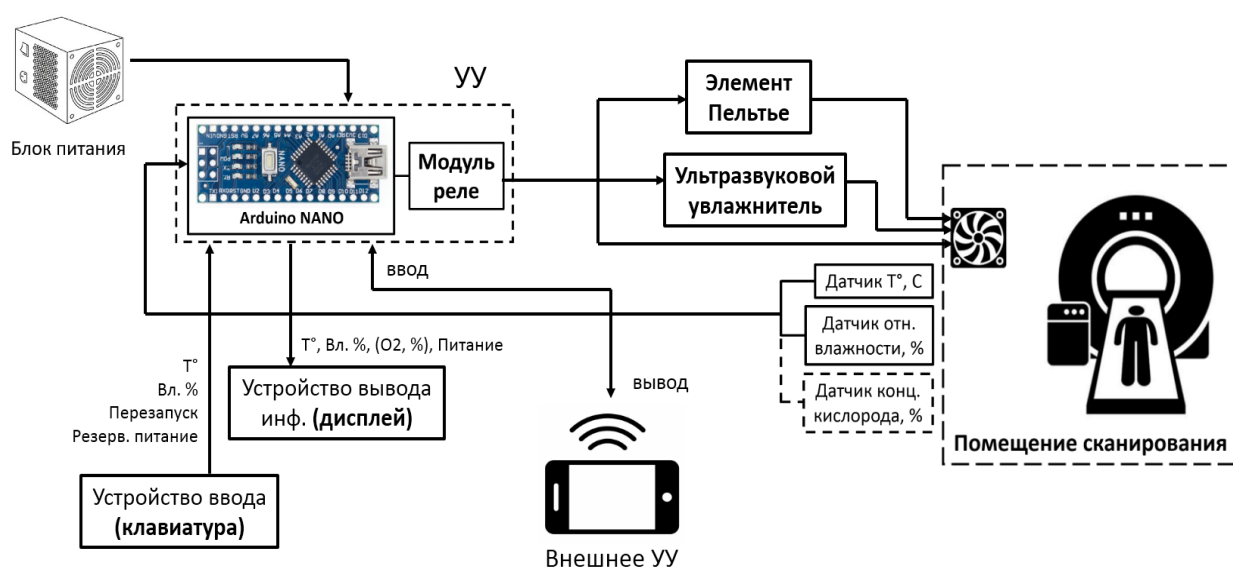


Рис. 15. Принципиальная схема модели интеллектуальной системы на основе Arduino Nano

С датчиков на цифровой и аналоговый пины контроллера поступают данные, обрабатывая которые, он по разработанному алгоритму формирует регулирующие сигналы для переключения тех или иных элементов. При повышении температуры воздуха включается контур с охлаждением на элементах Пельтье, при повышении влажности – вентилятор, который проветривает помещение, при понижении влажности – ультразвуковой увлажнитель. Условие понижения температуры не рассматривается по ранее приведенной причине – это большое выделение тепла аппаратом МРТ.

Управление с внешнего устройства (смартфона или планшета) происходит при помощи специализированного приложения, связанного с микроконтроллером. Для осуществления управления необходимы: вывод показателей температуры, влажности, концентрации кислорода и питания на элементах системы; ввод данных для изменения показателей температуры и влажности, а также перезапуска системы и переключения на резервное питание.

Для этого была использована платформа создания приложения, связующего микроконтроллер и устройство управления – RemoteXY. Она позволяет пользователю сделать индивидуальный интерфейс, добавляя различные функции под необходимые ему параметры. На рисунке 16 видим пример разработанного интерфейса для контроля показателей микроклимата, который включает: графики температуры и влажности, поля ввода пороговых значений, кнопку программного перезапуска системы, шкалу значений концентрации кислорода и функцию тревоги при повышении или понижении этого значения.

Особенно важным показателем для мониторинга является концентрация кислорода, так как это позволяет предотвратить аварийную ситуацию, связанную с выбросом гелия, и, как следствие, потерей сверхпроводимости электромагнита в аппарате МРТ. При падении значения данного показателя ниже нормы (гелий, стремящийся подняться вверх, вытесняет молекулы кислорода) происходит экстренное оповещение инженера с целью своевременного реагирования.

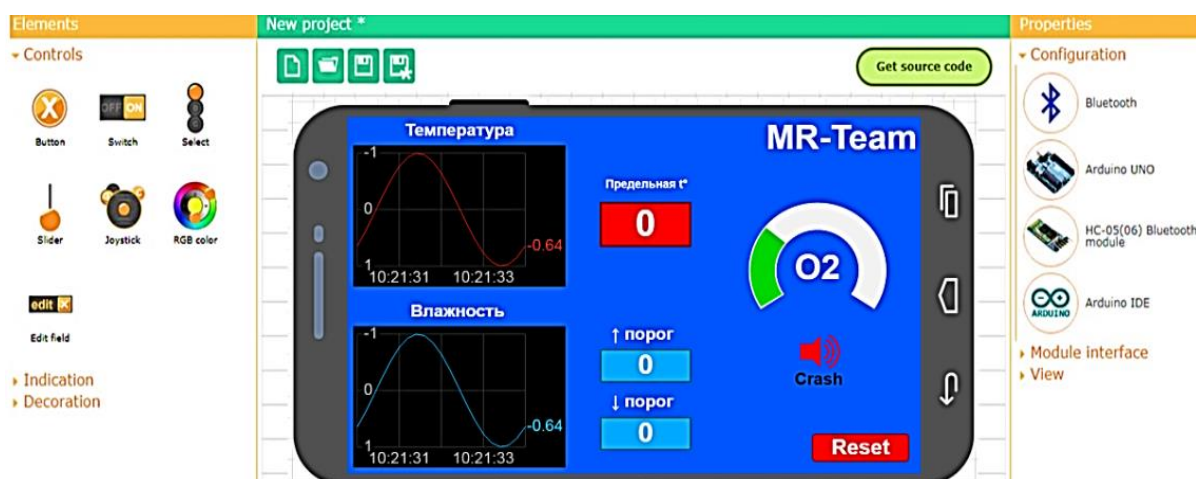


Рис. 16. Внешнее управляющее устройство

5.4. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА МАКЕТА

На рисунке 17 изображена принципиальная электрическая схема функционального макета кабинета МРТ для учебных и экспериментальных целей.

С блока питания 1 на плату Arduino на базе микроконтроллера Atmega328 2 модуль реле 3, модуль-bluetooth 11 и дисплей 10 подается 5 вольт. С микроконтроллера, в свою очередь, подается сигнал на 4-позиционный модуль реле 3, через который подается 12 вольт с блока питания на все элементы управления. Выходы реле идут на увлажнитель 4, 13 и все вентиляторы в системе 12, включая кулер 5.

При необходимости понижения температуры в помещении сканирования третье реле включает элементы Пельтье 6, а четвертое насос 7. Показатели температуры и влажности получаем с датчика DHT22 8. Показатели кислорода получаем с датчика кислорода 9. Все полученные данные выводятся на дисплей 10. С помощью модуля-bluetooth 11 осуществляется управление пороговыми значениями температуры и влажности со смартфона. А также эти данные представлены в графическом виде.

В разработанную интеллектуальную систему мониторинга параметров в кабинете МРТ в рамках макета интегрирован датчик концентрации кислорода в помещении.

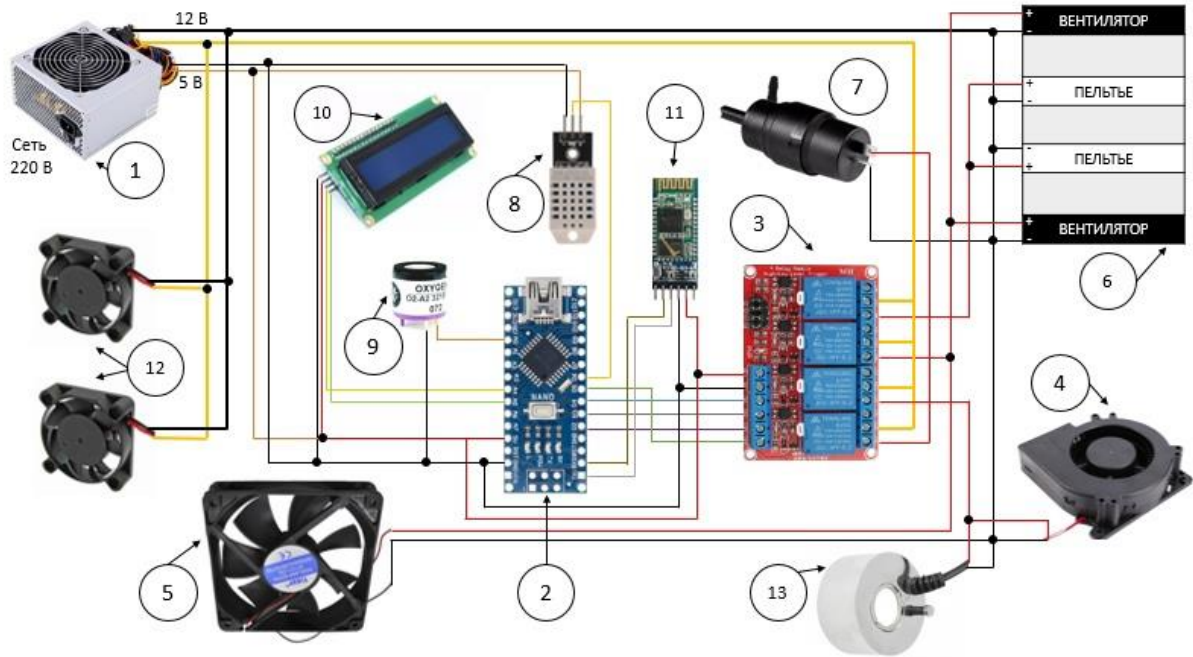


Рис. 17. Принципиальная электрическая схема

С помощью данного датчика, который работает через алгоритм на плате Arduino, происходит автоматическое отслеживание уровня кислорода в помещении. При изменении уровня кислорода срабатывает сигнал, который отключает систему, для того чтобы избежать утечку гелия и опасности, возникающей при этой утечке.

Учебное электронное издание

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МАКЕТ
КАБИНЕТА МРТ ДЛЯ УЧЕБНЫХ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ЦЕЛЕЙ**

Методические указания

Составители:

ФРОЛОВ Сергей Владимирович
ФРОЛОВА Татьяна Анатольевна

Редактирование Е. С. Мордасовой
Графический и мультимедийный дизайнер Н. И. Кужильная
Обложка, упаковка, тиражирование Е. С. Мордасовой

Подписано к использованию 23.04.2026.

Тираж 50 шт. Заказ № 59

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещение 2, к. 14.
Тел./факс (4752) 63-81-08.
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru