

Концепция цифрового двойника комплекса лучевой терапии

Аннотация

Рассмотрены основные подходы к разработке цифрового двойника для отечественного комплекса лучевой терапии КЛТ-6, разрабатываемого Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом», предложена структурная схема. Рассмотрены вопросы увеличения надежности основных систем КЛТ-6, основанные на применении цифрового двойника. Предложено применение систем 3D-сканирования, виртуальной реальности для повышения потребительских свойств и обеспечения конкурентоспособности.

Согласно оценкам Международного агентства по исследованию рака (IARC), приведенным в отчете World Cancer Report 2014, число зарегистрированных случаев онкозаболеваний увеличилось с 12,7 млн в 2008 году до 14,1 млн в 2012 году, и эта тенденция, по прогнозам, продолжится [1]. Одной из главных причин высокой смертности онкологических больных является отсутствие необходимого современного медицинского оборудования.

Наибольшее значение в онкологии приобрела лучевая терапия как наиболее эффективная и применимая при запоздалой диагностике. Лечебный эффект лучевой терапии заключается в повреждении ионизирующим излучением важных компонентов опухолевых клеток, в результате чего такие клетки погибают. Окружающие клетки осуществляют резорбцию поврежденных излучением клеток и замещение опухолевой ткани рубцовой.

Более половины всех онкологических больных (около 70 %) нуждаются в лечении методами лучевой терапии, которые применяются либо как часть основного лечения, либо в связи с рецидивами, либо как паллиативное лечение [2]. При этом оснащенность медицинских учреждений России позволяет лечить до 30 % нуждающихся, а материальное оснащение отечественных онкологических клиник отстает на 15...20 лет от оснащения аналогичных западных клиник [3]. Медицинские учреждения Российской Федерации нуждаются в оснащении не менее чем 300 комплексами лучевой терапии (КЛТ) [4]. Организация и производство отечественной аппаратуры для лучевой, радионуклидной диагностики и терапии является в настоящее время одной из основных задач отечественной ядерной медицины.

Лучевая терапия является многодисциплинарной специальностью, в которой используют сложное оборудование и источники ионизирующего излучения. Особые требования предъяв-

ляются к механической части комплексов лучевой терапии: для снижения дозы, полученной здоровыми тканями при облучении, необходимо воспроизведение комплексом дозного поля, заданного лечащим врачом, с погрешностью не более 1 мм. Комплексы лучевой терапии, основанные на кобальтовых источниках гамма-излучения, требуют периодической замены источников, активность которых нельзя прекратить на время укладки пациента, что приводит к облучению персонала.

На данный момент на рынке представлены только импортные комплексы лучевой терапии, основанные на перспективных линейных ускорителях электронов. Наиболее целесообразным решением обозначенных проблем является разработка и оснащение отечественным современным оборудованием, в том числе комплексами лучевой терапии, имеющихся медицинских учреждений России, что позволит повысить излечиваемость больных.

В настоящее время Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации совместно с Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова и Национальным ядерным исследовательским институтом «МИФИ» ведут разработку импортозамещающего радиотерапевтического комплекса КЛТ-6 на основе линейного ускорителя электронов с энергией 6 МэВ для реализации процедур трехмерной конформной лучевой терапии в статическом и ротационном режиме. Создание такого комплекса позволит значительно повысить качество медицинского обслуживания в России в области радиотерапии.

Требования, предъявляемые к разработке КЛТ-6, не уступают, а по ряду параметров превосходят технические характеристики последних моделей зарубежных комплексов лучевой терапии. Разработка ведется с применением передовых технологий, обеспечивающих конкурентные преимущества комплекса на зарубежном рынке.

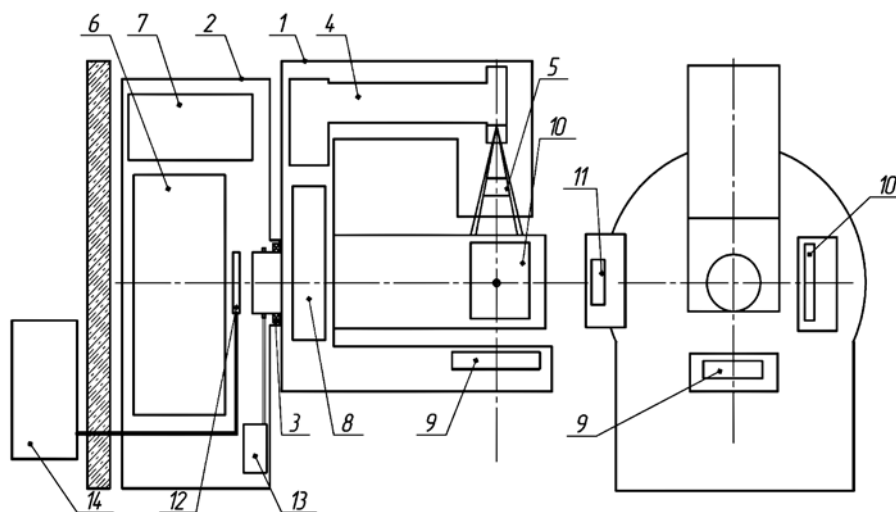


Рис. 1. Структурная схема КЛТ-6: 1 – рама поворотная; 2 – стойка опорная; 3 – подшипниковый узел; 4 – ускоритель электронов; 5 – блок коллимации ионизирующего излучения; 6 – модулятор; 7 – генератор рентгеновского излучения; 8 – система контроля и управления ускорителем; 9 – детектор портальной системы визуализации; 10 – детектор конусно-лучевой компьютерной томографии; 11 – рентгеновская трубка; 12 – система укладки кабелей и шлангов; 13 – привод рамы поворотной; 14 – чиллер

В состав разрабатываемого комплекса входят:

- гантри со смонтированным на него ускорителем электронов 6 МэВ со всеми вспомогательными системами: конусно-лучевой компьютерной томографией, системой портальной визуализации положения пациента в мегавольтном пучке, системой коллимации, системой световой визуализации дозового поля и прочими вспомогательными подсистемами;
- стол пациента;
- система дозиметрического планирования облучения;
- информационно-управляющая система;
- система автоматизированного управления, включая стойку управления, терминал управления, ручной пульт управления.

Структурная схема КЛТ-6 изображена на *рис. 1*.

Механическая часть гантри состоит из рамы поворотной 1, стойки опорной 2. Обеспечение поворота рамы поворотной относительно стойки опорной осуществляется при помощи подшипникового узла 3, приводимого в движение приводом рамы поворотной 13. Ускоритель электронов 4, блок коллимации ионизирующего излучения 5, система контроля и управления ускорителем 8 располагаются на внутренней части рамы поворотной. Система конусно-лучевой компьютерной томографии состоит из детектора конусно-лучевой компьютерной томографии 10 и рентгеновской трубки 11. Комплекс имеет функцию портальной визуализации, изображение которой формируется при помощи детектора портальной системы визуализации 9 за счет облучения пациента мегавольтным пучком ускорителя. Крупногабаритные элементы комплекса в составе модулятора 6, генератора рентгеновского излучения 7 расположены на стойке опорной. Для передачи управляющих сигналов, питания и охлаждения электронных блоков, расположенных на раме поворотной, применяется система укладки кабелей и шлангов 12. Охлаждение модулятора и клистрона осуществляется за счет прокачивания воды чиллером 14, расположенным в каньоне.

По сравнению с существующими аналогами разрабатываемая КЛТ-6 имеет ряд преимуществ:

- использование ускоряющей структуры С-диапазона, имеющей большую эффективность преобразования СВЧ-энергии в энергию ускоренного пучка, меньшие массу и габариты по сравнению с аналогами, имеющими структуру S-диапазона;
- использование компактного клистрона с фокусировкой постоянными магнитами, способного работать на воздухе и имеющего массу в десятки раз меньшую, чем у зарубежных аналогов;
- использование компактного твердотельного модулятора, имеющего высокую надежность, малые габариты и массу и обеспечивающего плавное регулирование амплитуды высокого напряжения, длительности импульса, частоты повторения импульсов;
- наличие различных вариантов регулирования энергии ионизирующего пучка и мощности дозы, которые позволяют гибко регулировать указанные параметры и частоту следования импульсов, обеспечивая высокую стабильность параметров излучения;
- создание более совершенной системы трехмерного дозиметрического планирования, основанной на архитектуре клиент-сервер, с интеграцией базы данных пациентов в базу системы верификации процедур лучевой терапии, с возможностью планирования всех методик лучевой терапии, реализуемых с помощью ускорителя. Система дает возможность оптимизации плана облучения за счет наличия уникальных алгоритмов и инструментов оконтуривания и выделения приграничных областей для определения объемов исследования на компьютерных томографах или в мультимодальной среде визуализации посредством совмещения изображений для данных компьютерной томографии, магнитно-резонансной томографии.

В настоящее время из-за недостатка медицинских ускорителей электронов они, как правило, эксплуатируются в две

смены, облучение пациентов ведется на комплексах разных фирм-производителей в непрерывном режиме, с интервалом 15...30 мин. Поломка КЛТ в таком режиме работы приводит к длительному выходу из строя оборудования, так как для ремонта необходимо обращаться в сервисные центры разных фирм, выполнять процедуру диагностики, заказывать дорогостоящие импортные комплектующие через процедуру электронных торгов. Ремонт КЛТ в зависимости от характера поломки может продолжаться несколько месяцев. Вышеприведенные обстоятельства приводят к срыву лечебного плана нескольких сотен пациентов и, как следствие, к снижению процента излечения.

Работа систем комплекса лучевой терапии должна контролироваться при помощи дублированных или, в случае особо ответственных элементов, троированных датчиков, позволяющих в режиме реального времени подтверждать соответствие рабочих параметров оборудования проектным критериям, а также гарантирующих корректность выполнения процедуры лучевой терапии. Для минимизации простоев КЛТ, связанных с поломкой, необходимо своевременно проводить техническое обслуживание.

Способы планирования мер по техническому обслуживанию и ремонту классифицируются следующим образом:

- техническое обслуживание по событию или реактивное обслуживание;
- планово-предупредительный ремонт;
- обслуживание по фактическому состоянию.

Наиболее передовым видом технического обслуживания является обслуживание по фактическому состоянию [5]. Оно подразумевает устранение отказов оборудования путем интерактивной оценки технического состояния оборудования по совокупности данных, поступающих с его датчиков, и определения оптимальных сроков проведения ремонтных работ.

Для обеспечения возможности обслуживания по фактическому состоянию и достижения высоких показателей коэффициента использования КЛТ необходимо собирать в единую базу данных информацию о работе всех КЛТ, проводить корреляционный и статистический анализ возникших в ходе эксплуатации неисправностей. В результате формируется основа для создания цифрового двойника (ЦД), который можно использовать для анализа текущего состояния, поиска потенциальных проблем и их решений, а также исследовать пути улучшения продукта.

Цифровой двойник – это виртуальный прототип реального физического устройства, группы изделий или процесса, который моделирует технические характеристики, внутренние процессы и поведение реального объекта в условиях окружающей среды. Важной особенностью цифрового двойника является то, что для задания на него внешних воздействий используется информация с датчиков реального устройства, работающего параллельно. Далее возможно проведение сравнения информации виртуальных датчиков цифрового двойника с датчиками реального устройства, выявление аномалий и причин их возникновения.

Структурная схема ЦД состоит из двух блоков (*рис. 2*). Первый блок включает в себя КЛТ с установленными датчиками для контроля эксплуатационных параметров комплекса, а также датчики для контроля условий работы: влажности, температуры воздуха и радиационного фона в каньоне, в котором находится КЛТ. Накопленные и систематизированные данные об условиях работы позволяют выбрать и контролировать оптимальные условия работы комплекса. Задачей данного блока является обработка данных со всех датчиков по заложенным алгоритмам и математическим моделям. Результатом работы блока является систематизированная информация о текущем состоянии комплекса и необходимости проведения технического обслуживания. Данный блок является самостоятельным цифровым двойником с полным функционалом.

Второй блок представляет собой центр разработки, сервисного обслуживания и обучения персонала. Он объединяет в себе базу данных, облачные вычисления, систему виртуальной и дополненной реальности и предназначен для хранения дан-

ных, совершенствования моделей, алгоритмов работы ЦД и КЛТ, а также для осуществления модернизации и технической поддержки. База данных содержит: данные, поступающие со всех комплексов, подключенных к ней; версии математических моделей и алгоритмов обработки, которые совершенствуются в результате машинного обучения и анализа работы всех комплексов; комплект документации на комплексы в электронном виде; данные 3D-сканирования; данные для виртуальной и дополненной реальности; информацию о времени и режимах эксплуатации; информацию о поломках и техническом обслуживании.

Технологии виртуальной реальности могут быть применены для уменьшения стоимости, сроков разработки и согласования как отдельных элементов КЛТ, так и изделия в сборе, а также для сокращения ошибок при совместной работе дизайнеров, инженеров и других участников проекта. В виртуальной реальности возможна работа с полномерным цифровым прототипом КЛТ: оценка внешнего вида; визуализация результатов инженерных расчетов, выполненных методом конечных элементов; проверка эргономики; проведение виртуальных испытаний; обучение медицинского и обслуживающего персонала при помощи интерактивных инструкций; оптимизация процессов сборки и технического обслуживания. При помощи 3D-сканирования возможно совмещение в виртуальном пространстве исходной 3D-модели с изготовленным или уже функционирующим в медицинском учреждении КЛТ. Такое совмещение поможет определить точность изготовления как отдельных деталей, так и всей механической части комплекса в сборе, а также может быть применено для определения мест локализации деформаций, возникающих в любых положениях нагруженной поворотной рамы. Также технологии виртуальной реальности могут быть полезны для демонстрации покупателям внешнего вида и возможностей разрабатываемого комплекса.

Заключение

Предложена структурная схема и рассмотрены основные аспекты применения цифрового двойника разрабатываемого в России комплекса лучевой терапии КЛТ-6. Показано, что для обеспечения конкурентоспособности разрабатываемого комплекса необходимо создание его цифрового двойника.

Работа подготовлена в рамках выполнения соглашения между Минобрнауки России и АО «НИИТФА» о предоставлении субсидии от 03.10.17 г. № 14.582.21.0011 «Создание и передача на клинические испытания образца импортозамещающего комплекса лучевой терапии на базе инновационного оборудования (6 МэВ ускорителя и конусно-лучевого томографа)». Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI58217X0011.

Список литературы:

1. World Cancer Report 2014, IARC.
2. Разработка программы лучевой терапии: аспекты клинической практики, медицинской физики, радиационной защиты и безопасности / ИЕАЕ, 2015.
3. Статус и перспективы развития ядерной медицины и лучевой терапии в России на фоне мировых тенденций / Доклад общественной палаты РФ. – М., 2008.
4. <https://ria.ru/atomtec/20180813/1526448893.html>.
5. Решетников С.О., Иванов С.Л., Абаишев А.Р. Совершенствование системы технического обслуживания и ремонта технологического оборудования нефтеперерабатывающих предприятий // Master's Journal. 2017. № 1. PP. 109-114.

Илья Игоревич Родько,
ведущий инженер,

Мария Владимировна Баданова,
инженер,

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

Валентин Пателеймонович Смирнов,
академик РАН,

профессор, научный руководитель,

АО «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации»,

Александр Васильевич Берестов,

канд. социолог. наук, доцент,

зам. директора Института физико-

технических интеллектуальных систем,

Юрий Олегович Жуковский,

инженер-исследователь,

ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,

Анатолий Сергеевич Евтеев,

руководитель проектного офиса,

АО «Научно-исследовательский институт технической физики и автоматизации»,

Николай Васильевич Шведун,

ведущий инженер-конструктор,

ООО «Лаборатория электронных

ускорителей МГУ»,

г. Москва,

e-mail: iirodco@mephi.ru

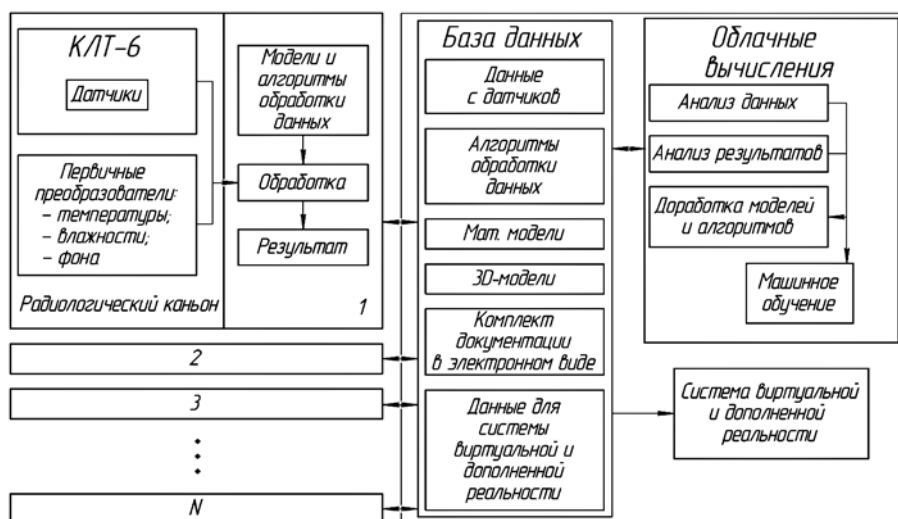


Рис. 2. Структурная схема ЦД КЛТ