

УДК 537.86

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТСТРОЕННОГО РЕЗОНАТОРА ТИПА «ПТИЧЬЯ КЛЕТКА» ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ВНУТРИ ТОННЕЛЯ АППАРАТА МАГНИТНО-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Бурмистров О. И. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – к.ф.-м.н. Олехно Н.А. (Университет ИТМО)

Введение. Магнитно-резонансная томография (МРТ) является ключевым методом неинвазивной диагностики большого числа заболеваний человека, таких, как рак, болезни внутренних органов, внутренние травмы и другие. Для проведения диагностики пациента на аппарате МРТ используются ближнепольные локальные антенны, называемые традиционно в области МРТ локальными катушками (local coils), которые размещаются вблизи исследуемого органа. Эти локальные катушки содержат в себе электронику, требующую обеспечения электропитанием, которое осуществляется громоздкими кабелями со специальными радиочастотными фильтрами, что усложняет процесс подготовки к сканированию, снижает комфорт пациента во время сканирования, а также требует периодического технического обслуживания. На текущий момент существуют технические решения для беспроводного электропитания локальных катушек [1], однако такие решения обеспечивают малую мощность [2, 3], требуют дополнительной передающей антенны [4], либо энергия передаётся очень короткими импульсами во время фазы возбуждения ядер атомов (время возбуждения – порядка десятков миллисекунд, время повторения – порядка секунды) [5], что усложняет электронику для приёма и передачи энергии, а также накладывает ограничения на максимально передаваемую мощность. Решением всех указанных проблем является беспроводная передача энергии с помощью резонатора, встроенного в аппарат МРТ, во время фазы приёма сигнала от ядер, которая длится в сотни раз дольше фазы возбуждения ядер атомов.

Методы. Для численного моделирования использовался программный пакет CST Microwave Studio 2024. Расчёты картин электрического и магнитного полей, а также эффективности беспроводной передачи энергии проводились с помощью модифицированного метода конечных элементов (Frequency Domain) с применением модели цилиндрического фантома, имитирующего усреднённые параметры тела человека на заданной частоте. Для оценки безопасности беспроводной передачи энергии для пациента применялся модифицированный метод конечных разностей во временной области (Time Domain) с воксельной моделью человека (Gustav). Измерение параметров рассеяния резонатора типа «птичья клетка» Siemens Avanto Body Coil проводилось с помощью векторного анализатора цепей Planar S5048.

Результаты. Была построена подробная численная модель резонатора типа «птичья клетка» Siemens Avanto Body Coil с экраном, системой приёмных антенн, фантомом (воксельной моделью человека при исследовании безопасности) на основе работы [5]. Сравнение параметров рассеяния численной модели и экспериментального стенда резонатора на основе Siemens Avanto Body Coil показали отличие по частоте не более 5% на основной частоте. В численную модель резонатора была добавлена система отстройки от рабочей частоты, которая расположена в образованном разрыве элементов резонатора, параллельном направлению постоянного поля B_0 . Во время фазы возбуждения в этих разрывах располагаются резисторы с нулевым сопротивлением, во время фазы приёма сигнала от ядер в разрывах располагаются индуктивности, снижая частоту работы резонатора и смещая частоты мод. Численное моделирование картины

электрического и магнитного полей показало, что они имеют ту же конфигурацию, что и в не отстроенном резонаторе на основной моде и модах высокого порядка. Эффективность беспроводной передачи энергии на основной моде колебаний слабо зависит от положения внутри резонатора и повышается для всех мод (включая основную) при приближении к краю тоннеля. Оценка безопасности для пациента показала, что получаемой системой приёмных антенн энергии достаточно для обеспечения электропитанием большинства типов приёмных локальных катушек и медицинских датчиков, и при этом уровень излучения от резонатора безопасен для пациента.

Заключение. На основе модели резонатора от клинического аппарата МРТ Siemens Avanto Body Coil с модифицированной системой отстройки в ходе численного моделирования для отстроенного резонатора показано, что эффективность беспроводной передачи энергии зависит от положения приёмной системы внутри резонатора (чем ближе приёмник к краю резонатора, тем выше эффективность), поле резонатора безопасно при обеспечении электропитанием большинства типов приёмных катушек для МРТ, картины мод отстроенного и настроенного на Ларморову частоту резонатора качественно совпадают, а также что частоты мод уменьшаются при отстройке. Для непрерывного обеспечения приёмных катушек электропитанием, возможно использовать предложенную систему во время приёма сигнала от ядер, а во время возбуждения ядер применять для передачи энергии систему из работы [5].

Список используемых источников:

1. L. Nohava, *et al.*, Perspectives in wireless radio frequency coil development for magnetic resonance imaging, *Front. Phys.* **8**, 11 (2020).
2. P. Seregin, O. Burmistrov, *et al.*, Energy-harvesting coil for circularly polarized fields in magnetic resonance imaging, *Phys. Rev. Appl.* **17**, 044014 (2022).
3. A. Ganti, *et al.*, A novel energy harvesting circuit for RF surface coils in the MRI system, *IEEE Trans. Biomed. Circuits Syst.* **15**, 791 (2021).
4. K. Byron, *et al.*, An MRI compatible RF MEMs controlled wireless power transfer system, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **67**, 1717 (2019).
5. O. Burmistrov *et al.*, Wireless power transfer in magnetic resonance imaging at a higher-order mode of a birdcage coil, *Phys. Rev. Appl.* **21**, 014047 (2024).