

Научная статья

УДК 621.396

DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202402-05>

Резонансные свойства погруженного в воду соленоида

Н.В. Анисимов¹, Ю.А. Пирогов²^{1,2} Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия)¹ anisimovnv@mail.ru, ² yupi937@gmail.com

Аннотация

Постановка проблемы. В явлении ядерного магнитного резонанса и магнитно-резонансной томографии для повышения сигнала от малой зоны применяют так называемые беспроводные катушки. В их основу положен LC-контур малого размера, индуктивно связанный с обычной катушкой, подключаемой к приёмнику с помощью кабеля. Обычно беспроводной LC-контур реализуют на сосредоточенных элементах. Известно, что для беспроводной катушки достаточно и одного сосредоточенного элемента – индуктивности. Для этого соленоид необходимо погрузить в воду. Такой эффект выявлен на изображениях ядерного магнитного резонанса во время проведения экспериментов по визуализации магнитно-резонансной томографии погруженных в воду металлических предметов после выпадения сигнала от них на фоне сигнала воды.

Цель. Отметить основные особенности эффекта усиления сигнала ядерного магнитного резонанса внутри погруженной в воду катушки, дать количественные оценки и отметить возможные его практические применения.

Результаты. Получены изображения, демонстрирующие эффект значительного (до 4 раз) усиления сигнала ядерного магнитного резонанса внутри соленоида по сравнению с сигналом вне его. Показано, что эффект зависит от электропроводности воды, а потому работает лишь в чистой (дистиллированной) воде, в противном случае – вместо повышения сигнала внутри соленоида возможно его снижение. Приведены расчеты параметров, определяющих основные свойства контура на базе соленоида, погруженного в воду, – величины распределенной емкости, взаимной индукции между контуром и проводной катушкой, электропроводности воды. Отмечено хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных.

Практическая значимость. Эффект увеличения межвитковой емкости при погружении катушки в воду можно использовать для уточнения значения этой величины в обычных условиях, т.е. в воздушной среде, поскольку по мере увеличения емкости повышается точность её определения при использовании типовых измерительных приборов.

Ключевые слова

Резонансный контур, беспроводная катушка, межвитковая емкость, ядерный магнитный резонанс, магнитно-резонансная томография, электропроводность воды

Исследование поддержано Научно-образовательными школами Московского государственного университета «Молекулярные технологии живых систем и синтетическая биология» и «Фотонные и квантовые технологии. Цифровая медицина».

Для цитирования

Анисимов Н.В., Пирогов Ю.А. Резонансные свойства погруженного в воду соленоида // Электромагнитные волны и электронные системы. 2024. Т. 29. № 2. С. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.18127/j5604128-202402-05>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

В явлении ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и магнитно-резонансной томографии (МРТ) для повышения сигнала от малой зоны применяют так называемые беспроводные катушки [1–4]. В их основу положен LC-контур малого размера, индуктивно связанный с обычной катушкой, подключаемой к приёмнику с помощью кабеля. Это упрощает манипуляции с живым объектом, позволяет имплантировать и/или размещать контур вблизи зоны интереса, что, в свою очередь, обеспечивает высокий фактор заполнения и сильный сигнал ЯМР от этой зоны. Беспроводные катушки используются также в других областях техники, например, для дистанционной передачи энергии [5].

Обычно беспроводной LC-контур реализуют на сосредоточенных элементах. Известно, что для беспроводной катушки достаточно и одного сосредоточенного элемента – индуктивности. Для этого соленоид необходимо погрузить в воду. Такой эффект выявлен на ЯМР-изображениях во время проведения экспериментов по МРТ-визуализации погруженных в воду металлических предметов после выпадения сигнала от них на фоне сигнала воды [6]. Следует обратить внимание на кратную (до 4 раз) разницу в интенсивности сигналов внутри и вне находящегося в воде соленоида. При этом объем воды большого

значения не имеет – важно лишь, чтобы она охватывала пространство рядом с катушкой, а сама вода была достаточно чистой. Для объяснения эффекта предположим, что присутствие воды в области витков соленоида увеличивает его межвитковую емкость на величину диэлектрической постоянной воды, т.е. в 80 раз, и создает условия для формирования на базе соленоида резонансного контура. Следовательно, если вода обладает малой электропроводностью, что характерно для хорошо очищенной воды, то такой контур имеет высокую добротность и способен усиливать сигнал ЯМР.

Ц е л ь р а б о т ы – отметить основные особенности эффекта усиления сигнала ядерного магнитного резонанса внутри погруженной в воду катушки, дать количественные оценки и отметить возможные его практические применения.

Материалы и методы исследования

Измерения проводились на 0,5 Тл клиническом томографе Bruker Tomikon S50. Прием сигнала осуществлялся на фирменную катушку, предназначенную для исследования головы человека (рис. 1, в). Катушка квадратурная, содержит два канала усиления CI и CII. Каждый из них представлен двумя контурами – L_1C_1 и L_2C_2 . При этом оси обмоток L_1 и L_2 ориентированы взаимно перпендикулярно (рис. 1, г). Рисунок упрощенный – форма витков у катушек представлена в виде окружностей, хотя в действительности обе катушки седловидные. Каждая обмотка входит в состав контура, настраиваемого на частоту протонного резонанса (21,1 МГц) с помощью конденсаторов переменной емкости C_1 и C_2 . Сигналы с обмоток поступают на предварительные усилители (РА) и далее на сумматор PSCQ 2-21.4, с выхода которого сигнал идет в приемник для основного усиления и последующей оцифровки.

Радиочастотное (РЧ) возбуждение производилось с помощью приемопередающей катушки диаметром 60 см, встроенной в зазор магнита. На рис. 1 она не изображена, но отмечено направление создаваемого ею РЧ поля B_1 . Также, помимо фотографий соленоида и приемной катушки, представлены их эквивалентные схемы.

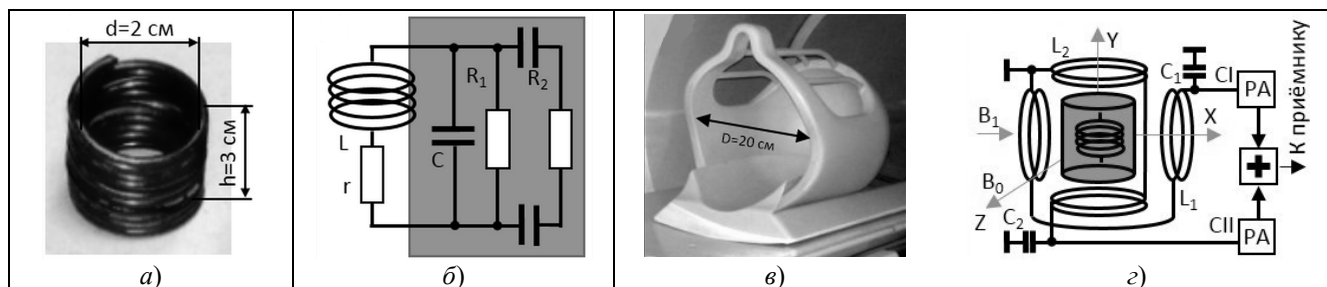


Рис. 1. Материалы исследования: а – фото соленоида с обозначением размеров внутреннего диаметра d и длины намотки h ; б – эквивалентная схема контура на основе погруженного в воду соленоида; в – фото проводной катушки с обозначением размера, примерно соответствующего диаметру витков и расстоянию между ними; г – схема проводной катушки в составе приемного тракта (заштрихованная зона в центре рисунка обозначает цилиндрический сосуд с водой, внутри которого помещен соленоид. Обозначены направления магнитных полей – поляризующего B_0 (ось Z) и РЧ B_1 (ось X))

Fig. 1. Materials of the study: а – photo of the solenoid with a designation of the dimensions of the inner diameter d and the length of the winding h ; б – an equivalent circuit diagram based on a solenoid immersed in water; в – photo of a wire coil with a designation of a size approximately corresponding to the diameter of the turns and the distance between them; г – diagram of a wire coil as part of the receiving path (the shaded area in the center of the drawing indicates a cylindrical vessel with water, inside which a solenoid is placed. The directions of the magnetic fields are indicated – polarizing B_0 (Z axis) and RF B_1 (X axis))

На рис. 1, б соленоид представлен в составе контура на основе катушки с индуктивностью L , обладающей омическим сопротивлением r , и межвитковой емкости C . Элементы в заштрихованной зоне зависят от параметров водной среды. Наличие сопротивлений R_1 и R_2 обусловлено проводимостью воды, из-за чего возможно протекание тока через оголенные концы намотки и между металлическими поверхностями проводника. Связь последних обозначена через разделительные ёмкости, поскольку предполагается, что сами поверхности электрически изолированы от воды либо из-за изолирующего покрытия (лак или пластик), либо из-за наличия оксидной пленки.

При заданной вертикальной ориентации соленоида РЧ-поле от передатчика направлено перпендикулярно его оси, а потому на него не воздействует, и резонансный контур на основе соленоида может усиливать сигнал индукции только от прецессирующих спинов.

Соленоид индуктивно связан с обмотками канала СП, поэтому на этот канал поступает не только сигнал индукции от прецессирующих спинов, но и усиленный сигнал от них, наводимый от соленоида. Тогда для канала СП выигрыш в усилении сигнала A может достигать величины $\sqrt{1+(KQ)^2}$, где Q – добротность беспроводного контура; K – коэффициент взаимной индукции между беспроводным и проводным контурами.

Обмотки канала СИ проводной катушки индуктивно не связаны с соленоидом, поэтому его присутствие не дает дополнительного усиления сигнала ЯМР внутри соленоида. В связи с этим, при двухканальном квадратурном детектировании выигрыш в усилении сигнала внутри соленоида меньше, чем при одноканальном детектировании:

$$A = 1 + \left(\frac{KQ}{2} \right)^2. \quad (1)$$

Однако двухканальное детектирование все же предпочтительнее, поскольку дает лучшее отношение сигнала к шуму – для зоны вне соленоида оно выше в 1,4 раза. При расчете величин A учитывалось, что фаза РЧ-поля, наводимого в проводной катушке от беспроводной катушки, отличается на 90° от фазы сигнала индукции, наводимого в проводную катушку прецессирующими спинами напрямую, а в процессе сложения сигналов от квадратурных каналов в сумматоре PSCQ 2-21.4 происходит смещение фазы сигнала одного из каналов на 90° [7].

Управление томографом и первичная обработка данных проводились фирменным программным обеспечением XWIN-NMR v.1 и ParaVision v.1. Ряд последующих операций с данными, включая построение графиков, проводились с помощью программы ImageJ [8].

МРТ-сканирование проводилось по методике спинового эхо с параметрами $TR/TE = 300/15$ мс. Сканировался срез толщиной 6 мм в коронарной проекции с разрешением 1×1 мм.

Зона сканирования охватывала емкость с водой, в которой размещался один или несколько соленоидов, установленных вертикально. На рис. 1 емкость с водой отображена в виде заштрихованного цилиндра. Результатом сканирования являются изображения поперечных срезов соленоидов, выявляемых по выпадению сигнала на фоне сигнала воды (рис. 2). Для оценки резонансного эффекта на изображениях сопоставлялись сигналы (интенсивности пикселей) в центре катушки и за пределами намотки.

Кроме того, апробировались разные типы соленоидов – из меди, алюминия, сплава олова со свинцом, очищенные от изоляции и покрытые лаком, в пластиковой изоляции, в каркасном варианте. Диаметр намотки (внутренний) составлял от 2 до 3 см, количество витков варьировалось от 4 до 16, толщина провода – 2 мм. В качестве жидкости применялась вода разной очистки, включая минеральную воду, а также физиологический раствор (0,9% раствор соли NaCl).

Помимо обычной воды использовались и другие вещества, заполняющие пространство в зоне расположения соленоида, в частности, фторсодержащая жидкость, так называемая «сухая вода» $C_6F_{12}O$ (продукт фирмы 3М [9]), а также газ перфторциклобутан C_4F_8 , при операциях с которым использовалась герметичная емкость. В обоих случаях детектировались сигналы ЯМР фтора (^{19}F). Опыт обращения с этими жидкостью и газом описан в [6, 10].

Для снятия зависимости сигнала от числа витков соленоида один из соленоидов, изначально содержащий 16 витков, последовательно подвергался отсечению одного-двух витков. После каждой такой операции производилось измерение МР-сигнала в его центре.

Для соленоида с внешним диаметром намотки 2,5 см, показавшего наилучшие результаты по усилению МР-сигнала, проводились измерения его параметров в обычных условиях – без погружения в воду. С помощью L/C метра LC200A (MingHe) [11] измерялась его индуктивность. Помимо этого, определялась добротность контура, содержащего эту индуктивность, при его настройке на частоту протонного резонанса 21,1 МГц. Для этого к соленоиду подключались две переменные емкости – одна параллельно для настройки на частоту $F = 21,1$ МГц, а другая последовательно для согласования с входным сопротивлением приемника (50 Ом), к которому контур присоединен через кабель. Процедура настройки и согласования контура проводилась с использованием фирменных средств по методике wobble [12].

Идея методики – подключить выход маломощного РЧ-генератора одновременно к двум цепям, одна из которых нагружена на эталонное сопротивление 50 Ом, а другая – на исследуемый контур, и измерять зависимость разности напряжений на этих нагрузках от частоты. В методике wobble данный разностный сигнал детектируется при развертке частоты, что позволяет наблюдать на экране монитора V-образную кривую, минимум которой достигается вблизи резонансной частоты контура. С помощью такой кривой удобно контролировать настройку контура на нужную частоту F и согласование его резонансного сопротивления, а по ее ширине Δf на уровне 0,7 измерять добротность контура согласно формуле

$$Q = \frac{F}{\Delta f}.$$

Для того, чтобы оценить влияние величины объема воды на эффект усиления сигнала, измерения проводились в условиях, где данный соленоид помещался в цилиндрические сосуды с разными внутренними диаметрами – от 3,5 см до 7,5 см.

Предпринимались попытки повысить сигнал при МРТ-сканировании водного растения, извлеченного из комнатного аквариума и помещенного внутрь соленоида, заполненного водой из того же аквариума.

Также проводились эксперименты с погружением в воду двух и более соленоидов, намотанных проводами из разных металлов, для оценки влияния на сигнал внутри них из-за разного взаимного расположения, имея в виду эффекты взаимной индукции.

Результаты исследования

В результате исследования обнаружено, что катушка из металлической (неферромагнитной) проволоки при погружении в воду может усиливать сигнал 1H ЯМР (21,1 МГц) внутри себя до 4 раз по сравнению с сигналом вне ее [6] (рис. 2, а слева). Усиление от 2 и более раз наблюдается для разных типов соленоидов – из меди, алюминия, сплава олова со свинцом. Они могут быть покрыты лаком и/или быть внутри изолирующей пластиковой трубки. Помимо этого, апробировались соленоиды, очищенные от лака и оксидного слоя, а также насаженные на каркас. Эффект не зависит от объема воды – достаточно, чтобы он охватывал объем только самого соленоида. Однако вода должна быть чистой – питьевой или дистиллированной. В воде минеральной или с добавками, повышающими ее электропроводность (парамагнетик, соль), эффект снижается или становится обратным. Для физиологического раствора (0,9% NaCl) сигнал внутри катушки почти в 3 раза меньше, чем вне ее (рис. 2, а справа).

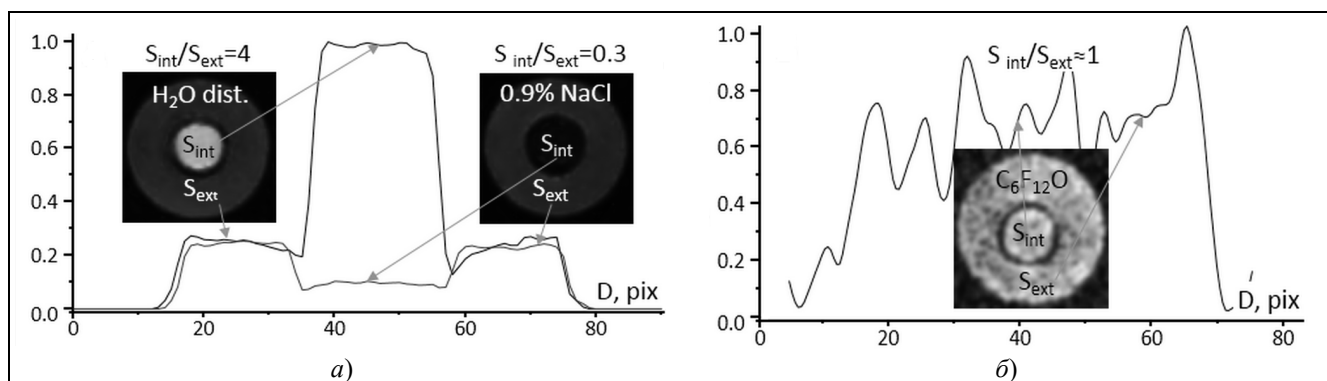


Рис. 2. Графики сигналов МРТ вдоль линии, проходящей через центры МРТ-изображений (S_{int} и S_{ext} – средние величины сигнала МРТ внутри и вне соленоида): a – 1H изображения (слева – соленоид, погруженный в дистиллированную воду; справа – соленоид, погруженный в физраствор); b – 19F изображение для соленоида, погруженного во фторсодержащую жидкость $C_6F_{12}O$

Fig. 2. Graphs of MRI signals along the line passing through the centers of MRI images (S_{int} and S_{ext} are the average values of the MRI signal inside and outside the solenoid): a – 1H images (on the left – a solenoid immersed in distilled water; on the right – a solenoid loaded in saline solution); b – 19F image for a solenoid immersed in a fluorinated liquid $C_6F_{12}O$

Наилучшие результаты по усилению сигнала были получены для десятивитковой катушки из медной, покрытой изолирующим лаком, проволоки толщиной 2 мм, внутренним и внешним диаметрами витка 2 см и 2,5 см, соответственно, и длиной намотки 3 см. Усиление сигнала в дистиллированной воде

оказалось четырехкратным. В обычных условиях (без погружения в воду) индуктивность данного соленоида составила 0,8 мкГн, а добротность контура, изготовленного на его основе, на частоте протонного резонанса 21,1 МГц составила 162.

Кроме того, эффект усиления сигнала внутри катушки, погруженной в воду, был использован для получения МРТ-изображения подводного растения. Однако эффект усиления оказался слишком незначительным – в 1,2 раза. По всей видимости из-за того, что использовалась вода из аквариума с рыбами и растениями, у которой проводимость больше, чем у питьевой воды, и, следовательно, на 1–2 порядка выше, чем у дистиллированной воды.

Отсутствие электрической проводимости у жидкости, в которую погружается соленоид недостаточно для проявления эффекта усиления сигнала внутри него. Данный эффект не наблюдается при погружении соленоида в непроводящие фторсодержащие среды – газ перфторциклобутан C_4F_8 и так называемую «сухую воду» $C_6F_{12}O$ (рис. 2,б).

Было замечено, что размещенные рядом соленоиды проявляют свойства связанных резонансных контуров. В частности, для идентичных соленоидов сигнал внутри каждого из них снижается по сравнению со случаем, когда они далеко разнесены. Если при далеком разнесении соленоиды обладают разным усилением из-за различной их добротности, то при их сближении эта разница снижается за счет увеличения сигнала для менее добротного соленоида и уменьшения для более добротного соленоида. При этом выигрыша в усилении не происходит. Наблюдать МРТ-изображения поперечных срезов таких соленоидов можно на рис. 3.

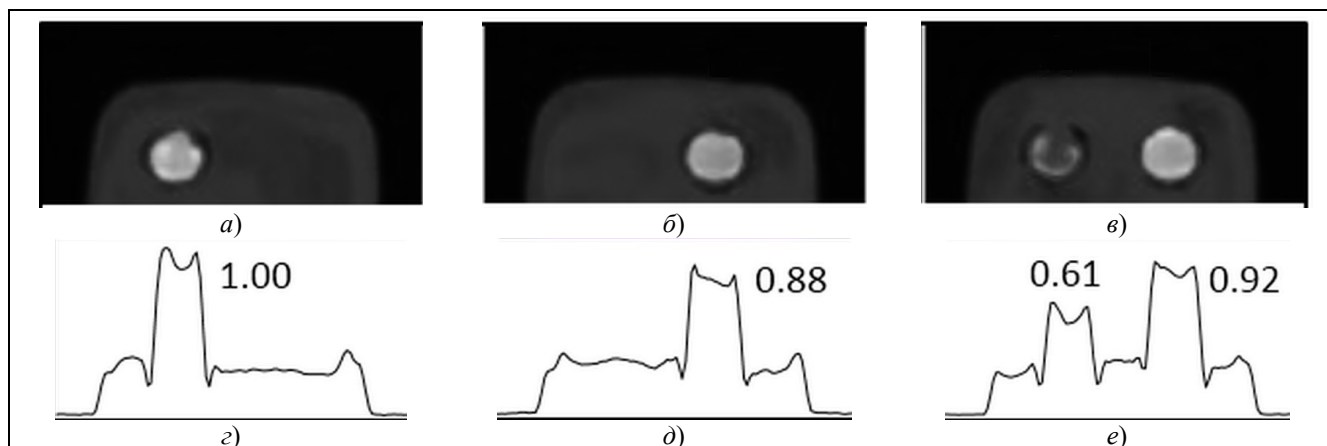


Рис. 3. МРТ-изображения поперечных срезов соленоидов из меди (а), алюминия (б) и при их близком расположении (в) в емкости с водой. Графики МРТ-сигналов вдоль горизонтальной линии, проходящей через центры соленоидов, при раздельном размещении соленоидов (г), (д) и при их близком расположении (е) (отмечены значения интенсивностей сигналов, нормированные для изолированного соленоида из меди)

Fig. 3. MRI images of cross sections of solenoids made of copper (a), aluminum (b) and when they are closely located (c) in a container with water. Graphs of MRI signals along a horizontal line passing through the centers of the solenoids, with separate placement of the solenoids (d), (e) and with their close location (f) (the values of signal intensities normalized for an isolated copper solenoid are noted)

Также можно отметить, что зависимость сигнала от числа витков не является монотонной, а имеет отчетливый максимум, что следует из рис. 4. Измерение проведено для медного соленоида с внутренним диаметром катушки 3 см.

Наблюдавшиеся при исследовании эффекты можно объяснить тем, что погруженный в воду соленоид образует с ней LCR-контур, где вода выполняет роль распределенных емкости C и проводимости $1/R$ (см. рис. 1,б). Если частота контура $\omega = (LC)^{-1/2}$ близка к ларморовой, а проводимость воды мала $R \gg (L/C)^{1/2}$, то беспроводной контур может заметно усиливать сигнал ядерной индукции. Эффект усиления сигнала можно наблюдать с помощью проводной катушки, которая индуктивно связана с соленоидом. Усиление может достигать до KQ раз, где $K = M(L_c L)^{-1/2}$ – коэффициент взаимной индукции [1–3]; M – коэффициент взаимной индукции между проводной катушкой и соленоидом, обладающих индуктивностями L_c и L , соответственно; $Q = \omega L/r$ – добротность контура на основе соленоида в непроводящей среде; r – омическое сопротивление. В данном случае при $Q = 162$ беспроводной контур обеспечивает усиление до 4 раз, что, согласно (1), соответствует $K = 0,021$.

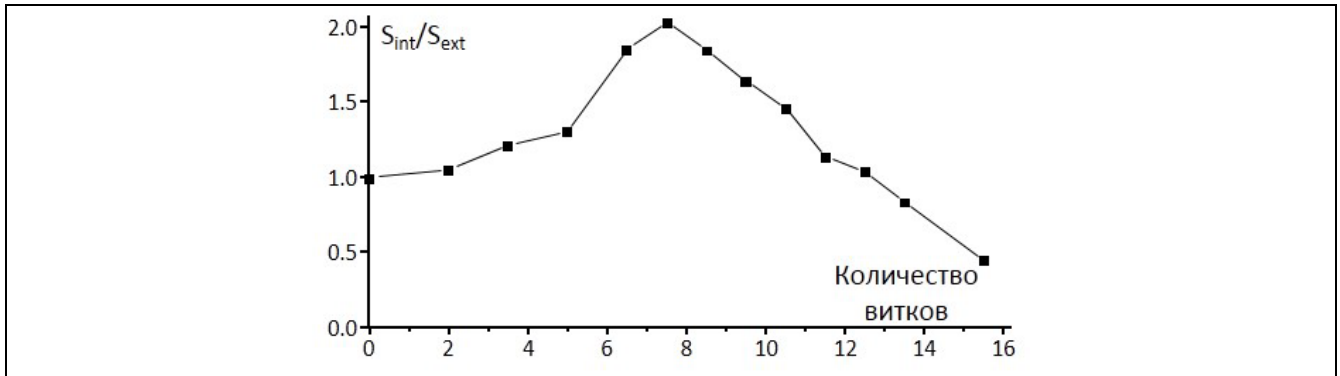


Рис. 4. График зависимости усиления сигнала ЯМР внутри погруженного в воду соленоида от числа его витков

Fig. 4. A graph of the dependence of the amplification of the nuclear magnetic resonance signal inside a solenoid immersed in water on the number of its turns

Для обоснования изложенной концепции оценим величины K , емкости C и проводимостей для описываемого случая.

Расчет коэффициента взаимной индукции

Аналитический расчет величины K для произвольной конфигурации катушек весьма сложен. В данном случае он осложняется ещё и тем, что параметры проводной катушки (см. рис. 1) известны лишь в самых общих чертах, и оценить можно лишь диаметр витков – 20 см. Однако экспериментально измерить индуктивность и хотя бы визуальную оценку диаметра провода не представляется возможным. Но будем считать, что величина K , в основном, зависит от пропорций между диаметрами катушек и расстоянием между ними. Исходя из этого, приведем результаты расчета K для наиболее простой конфигурации катушек – пары соосных кольцевых катушек диаметрами D и d с числом витков n_1 и n_2 , соответственно, разнесенных на расстояние Δ . При этом будем считать, что пропорции между этими параметрами такие же, как и для рассматриваемых катушек. Для соосных кольцевых катушек результат можно представить сравнительно простыми аналитическими выражениями [13], если выполняется требование

$$\frac{\frac{d}{D}}{\left(1 + \frac{d}{D}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta}{D}\right)^2} \ll 1. \quad (2)$$

Отсюда получаем

$$M = 2\mu\pi \frac{(Dd)^2}{(D^2 + d^2 + 4\Delta^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

Исследуемой ситуации соответствует конфигурация, когда $d \ll D$ и $\Delta = D$, что отвечает условию (2), и для M имеем

$$M = 2^{-\frac{7}{2}} \mu\pi n_1 n_2 \frac{d^2}{D}.$$

Индуктивности кольцевых катушек L_1 и L_2 рассчитываются по приближенной формуле [13]:

$$L_{1,2} \approx \mu D n_{1,2} \frac{\ln\left(\frac{4D}{t}\right) - 2}{2},$$

где t – диаметр провода.

Для простоты расчетов зададим в обеих кольцевых катушках отношения диаметров витка и провода одинаковыми и равными 10. Тогда для этих катушек получим

$$K = M(L_c L)^{-\frac{1}{2}} = 0,33 \left(\frac{d}{D} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

Видно, что результат не зависит от числа витков у катушек. В рассматриваемом случае соотношение диаметров примерно равно 0,1. Задавая такое же соотношение для кольцевых катушек, получим $K = 0,0104$, что примерно в 2 раза меньше, чем экспериментальный результат ($K = 0,021$). Следует принять во внимание, что в расчетах применялись весьма грубые оценки ряда величин, а также то, что соленоид взаимодействует не с одной, а с двумя обмотками – верхней и нижней (см. рис. 1,з), что соответственно увеличивает значение взаимной индукции в 2 раза. Если учесть перечисленные факторы и использование для расчетов упрощенной модели, то расхождение экспериментального значения K и его величины, рассчитанной для этой модели, оказывается совсем незначительным.

Расчет емкости контура для погруженного в воду соленоида

Поскольку по полученным данным эффект усиления сигнала ЯМР внутри погруженной в воду катушки не зависит от объема воды, то можно предположить, что распределенная емкость в основном локализована вблизи витков. Тогда целесообразно попробовать найти объяснение эффекта, исходя из предположения о наличии у соленоида межвитковой емкости C , величина которой увеличивается в присутствии воды. В рассматриваемом случае она увеличивается до значения, при котором с учетом индуктивности соленоида L как раз и обеспечивается резонанс, причем именно на ларморовой для протонов частоте. Для расчета межвитковой емкости разработаны эмпирические подходы с применением приближенных формул, графиков, таблиц. В [14, 15] для межвитковой емкости предложена формула $C = H \cdot d$, где d – диаметр катушки; H – коэффициент, зависящий от $k = h/d$; h – длина намотки.

Такой подход весьма поверхностный, поскольку отсутствует зависимость емкости от диаметра провода и шага намотки. Тем не менее для типичных катушек он дает хорошее согласие с экспериментом, а потому широко используется на практике.

Согласно [14, 15], для значений k от 0,5 до 2 величина H меняется в пределах от 0,46 до 0,5. В нашем случае $h/d = 3,0/2,0 = 1,5$ и $H = 0,47$. Тогда для межвитковой емкости имеем $C = 0,94$ пФ. Примерно такое же значение у соленоида, если для расчета применить подходы, изложенные в [16]. При погружении катушки в воду эта емкость возрастает на величину диэлектрической проницаемости воды, т.е. в 80 раз. В итоге получаем $C = 75$ пФ. Согласно формуле, связывающей частоту контура со значениями индуктивности и емкости, величина последней должна равняться 71 пФ. Рассчитанная величина межвитковой емкости весьма близка к данному значению, особенно если учесть, что индуктивность определена с погрешностью – она измерялась прибором, где применялся резонансный метод (частота резонанса $\sim 0,7$ МГц при декларируемой в инструкции пользователя 0,5 МГц [11]), в котором межвитковая (воздушная) емкость не учитывается, зато возможно влияние на измерение индуктивности реактивных параметров измерительных щупов.

Оценка проводимости среды, влияющей на добротность контура

Для того, чтобы оценить величину проводимости ($\sigma = 1/R_2$) (см. рис. 1,б), используется тот факт, что величины проводимости и емкости существенно зависят от одних и тех же параметров – большая площадь металла на поверхности объекта способствует их увеличению, а большое расстояние между поверхностями – их уменьшению.

Если предположить, что металлические фрагменты поверхности катушки, разделенные расстояниями от 0 до h , так влияют на распределение зарядов, что формируют собственную емкость соленоида, то не меньше оснований считать, что распределение этих фрагментов определяет и процесс распределения токов между ними. При этом геометрические пропорции указанных фрагментов как для зарядов, так и для токов, одинаковы. К тому же, для данной конфигурации фрагментов известны и величина емкости, и зависимость емкости от диаметра, пусть даже эмпирическая ($C \sim \varepsilon d$). Поэтому представляется логичным распространить аналогичную зависимость на процедуру оценки проводимости среды внутри катушки в виде $\sigma \sim (1/\rho) \cdot d$, где ρ – удельное сопротивление среды (в данном случае воды).

Для речной и питьевой воды значения ρ варьируются от 10 Ом·м до 80 Ом·м [17]. Если считать, что $\rho = 50$ Ом·м, а $d = 2$ см, то для $R_2 = 1/\sigma$ имеем $R_2 \sim 100$ Ом. Эта величина меньше резонансного сопротив-

ления контура $(L/C)^{1/2} = 130$ Ом, поэтому в такой воде резонансные свойства соленоида выражены плохо. Однако они хорошо выражены в дистиллированной воде, у которой ρ на два порядка выше (1250–5000 Ом·м [18]) и величина R_2 составляет десятки килоом.

Что касается сопротивления R_1 , то оно введено в схему (см. рис. 1,б) для учета проводимости непосредственно между концами катушки через проводящую среду (воду). Эту проводимость можно не учитывать, если концы катушки изолированы. Но если они оголены и размещены рядом, то учет этого сопротивления необходим. Несложно показать, что для типичных катушек, намотка которых проведена без выступающих длинных концов и при малом отношении толщины провода к длине намотки, величина R_1 даже в речной воде составляет сотни кОм.

Заключение

Полученные результаты вполне укладываются в концепцию, согласно которой многovitковый соленоид является резонансным контуром из-за наличия межвитковой емкости. Однако в обычных условиях выявить и реализовать для практических приложений его резонансные свойства сложно – реальная емкость контура может быть обусловлена не только межвитковой емкостью, но и вкладом сопоставимых по величине паразитных емкостей окружения, что обуславливает нестабильность частоты контура и плохую воспроизводимость измерений на частотах, близких к его резонансу. Помимо этого, из-за слишком малой емкости контура величина его резонансного сопротивления получается неприемлемо большой (намного больше стандартных 50 Ом), что затрудняет согласование контура с типовой нагрузкой. По этим причинам многovitковый соленоид не представляет практического интереса для использования в качестве резонансного контура.

Однако при погружении в воду величина межвитковой емкости возрастает в 80 раз, и паразитные емкости уже можно не принимать во внимание. Как показал проведенный опыт, в этом случае контур на основе соленоида может работать как резонансный на удобной для радиотехнических приложений частоте, а резонансное сопротивление контура может оказаться достаточно близким к 50 Ом. Если он индуктивно связан с проводным контуром, то такая конфигурация может быть интересна для приложений ЯМР и для МРТ, в частности. Например, для исследования объектов, погруженных в воду. Добротность катушки при хорошей очистке воды близка к той, что имеет место в обычных условиях без погружения соленоида в воду. Увеличение проводимости воды снижает добротность контура и его возможность усиливать сигнал индукции, наводимый в контуре, в том числе, и сигнал ЯМР.

Приведенные на основе данной концепции количественные оценки находятся в хорошем соответствии с экспериментальными данными. Не совсем ясна информационная ценность графика на рис. 4, поскольку каждому отсчету соответствует отдельный контур со своим значением не только индуктивности и межвитковой емкости, но и величины взаимной индукции. Тем не менее график имеет характерные для резонансной кривой особенности, что подтверждает резонансную природу исследуемого эффекта.

Помимо воды, неизвестны другие жидкости, в которых могут проявляться подобные эффекты – они либо проводящие, либо их диэлектрические проницаемости ϵ намного меньше, чем у воды, для которой $\epsilon = 80$, из-за чего меньше их распределенная емкость.

Выявлению эффекта большего усиления сигнала ЯМР внутри погруженной в воду катушки по сравнению с сигналом вне ее в рассмотренном случае благоприятствовало то, что резонансная частота выбранной для МР-визуализации катушки 21,1 МГц оказалась равной частоте протонного резонанса 0,5 Тл магнитно-резонансного томографа. Без погружения соленоида в воду его резонансная частота была бы почти в 9 раз выше (189 МГц). Но в таком диапазоне в качестве резонансных контуров более продуктивно (по крайней мере для МРТ) использовать специальные схемотехнические решения – резонаторы и т.п. [19].

Эффект увеличения межвитковой емкости при погружении катушки в воду можно использовать для уточнения значения этой величины в обычных условиях, т.е. в воздушной среде, поскольку по мере увеличения измеряемой емкости повышается точность её измерения при использовании типовых измерительных приборов. В воздушной среде межвитковая емкость мала – не более нескольких пФ, что сравнимо с емкостью измерительных зажимов. Увеличение межвитковой емкости в воде (в 80 раз) позволяет нивелировать этот фактор, а результат ее измерения в воде легко пересчитать для воздушной среды.

Из-за сильной зависимости эффекта от проводимости воды, вызывает сомнение возможность использования его для усиления МР-сигнала при МРТ-исследовании биологических объектов, поскольку живые водосодержащие ткани обладают электропроводностью. Переносчиками зарядов могут быть ионы, например, ионы натрия, которые активно вовлечены в процессы клеточного обмена [20]. Ионная активность имеется и у растений, но она более слабая, поскольку по сравнению с тканями животных межклеточное пространство у них намного меньше. Это затрудняет, например, детектирование сигнала ^{23}Na ЯМР от растений. Тем не менее присутствие ионов натрия достаточно сильно влияет на электропроводность воды. Возможно, этим объясняется то, что эффект усиления сигнала внутри катушки, погруженной в воду, взятую из аквариума с рыбами и растениями, весьма незначительный. Нельзя исключить и то, что замещение части природной воды дистиллированной (возможно, путем принудительного непрерывного протока) повысит его выраженность, однако это требует экспериментальной проверки.

Список источников

1. *Flack F.C., James E.D., Schlapp D.* Mutual Inductance of Air-Cored Coils: Effect on Design of Radio-Frequency Coupled Implants // Medical and Biological Engineering and Computing. 1971. V. 9. № 2. P. 79–85. DOI 10.1007/bf02474736.
2. *Schnall M.D., Barlow C., Subramanian V.H., Leigh J.S.* Wireless Implanted Magnetic Resonance Probes for in Vivo NMR // Journal of Magnetic Resonance. 1986. V. 68. № 1. P. 161–167. DOI 10.1016/0022-2364(86)90326-4.
3. *Degen C.* Inductive Coupling for Wireless Power Transfer and Near-field Communication // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. 2021. V. 2021. № 1. P. 1–20. DOI 10.1186/s13638-021-01994-4.
4. *Гуляев М.В., Павлова О.С., Волков Д.В., Анисимов Н.В., Пирогов Ю.А.* Разработка и применение имплантных катушек для получения МРТ-изображений с высоким пространственным разрешением // Биомедицинская радиоэлектроника. 2018. № 4. С. 41–51.
5. *Nohava L., Ginefri J.-C., Willoquet G., Laistler E., Frass-Kriegel R.* Perspectives in Wireless Radio Frequency Coil Development for Magnetic Resonance Imaging // Frontiers in Physics. 2020. V. 8. P. 11. DOI 10.3389/fphy.2020.00011.
6. *Anisimov N.V., Gervits L.L., Tarasova A.A., Usanov I.A., Pirogov Yu.A.* MRI of Inanimate Objects Using Fluorine-Containing Liquid // Applied Magnetic Resonance. 2023. V. 54. P. 895–904. DOI 10.1007/s00723-023-01580-5.
7. Power Splitter/Combiner. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.minicircuits.com/pdfs/PSCQ-2-21.4+.pdf>, дата обращения 30.10.2023.
8. *Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W.* NIH Image to ImageJ: 25 Years of Image Analysis // Nature Methods. 2012. V. 9. № 7. P. 671–675. DOI 10.1038/nmeth.2089.
9. Perfluoro (2-methyl-3-pentanone). [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://en.wikipedia.org/wiki/Perfluoro\(2-methyl-3-pentanone\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Perfluoro(2-methyl-3-pentanone)), дата обращения 30.10.2023.
10. *Anisimov N.V., Tarasova A.A., Usanov I.A., Pavlova O.S., Gulyaev M.V., Pirogov Yu.A.* Technological applications on a 0.5T clinical MRI scanner // Proceedings 20th International School-Conference «Magnetic resonance and its applications». Saint Petersburg: Saint Petersburg State University. 2023. P. 51–54.
11. LC200A Handheld L/C Meter Inductance Capacitance Meter. User Manual. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://mpl.jp/lc/LC200A%20%20EN%20V5.0.pdf>, дата обращения 30.10.2023.
12. XWIN-NMR Software Manual. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.pascal-man.com/pulseprogram/advance/xwinnmr-processing.pdf>, дата обращения 30.10.2023.
13. *Ramo S., Whinnery J.R., Van Duzer T.* Fields and Waves in Communication Electronics. Third Edition. John Wiley & Sons, 1994. 844 p.
14. *Medhurst R.G.* HF Resistance and Self-Capacitance of Single-Layer Solenoids // Wireless Engineer. 1947. Feb. P. 35–43.
15. *Medhurst R.G.* HF Resistance and Self-Capacitance of Single-Layer Solenoids // Wireless Engineer. 1947. Mar. P. 80–92.
16. *Knight D.W.* The self-resonance and self-capacitance of solenoid coils: applicable theory, models and calculation methods. 2016. 105 p. DOI 10.13140/RG.2.1.1472.0887.
17. Таблица выбора удельного сопротивления различных типов грунтов и воды. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ips-energo.ru/blog/tablitza-vybora-udel'nogo-soprotivleniya-razlichnykh-tipov-gruntov-i-vody/>, дата обращения 30.10.2023.
18. Distilled water. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Distilled_water, дата обращения 30.10.2023.
19. *Aliane K., Nasreddine B., Nadia B., Benkaddour A.* Resonators support UHF MRI systems // Microwaves and RF. 2012. V. 51. № 4. P. 84–92.
20. *Madelin G., Lee J.-S., Regatte R.R., Jerschow A.* Sodium MRI: methods and applications // Progress in Nuclear Magnetic Resonance and Spectroscopy. 2014. V. 79. P. 14–47. DOI 10.1016/j.pnmrs.2014.02.001.

Информация об авторах

Николай Викторович Анисимов – д.ф.-м.н., ст. науч. сотрудник

SPIN-код: 1558-1697

Юрий Андреевич Пирогов – д.ф.-м.н., профессор

SPIN-код: 8005-7976

Статья поступила в редакцию 10.01.2024

Одобрена после рецензирования 28.02.2024

Принята к публикации 26.03.2024

Original article

Resonant properties of a solenoid immersed in water

N.V. Anisimov¹, Yu.A. Pirogov²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russia)

¹ anisimovnv@mail.ru, ² yupi937@gmail.com

Abstract

MRI experiments in a field of 0.5 T are described, demonstrating an increase in the NMR signal inside a solenoid immersed in water compared to the signal outside it. The effect is explained by the fact that the solenoid in water becomes a wireless resonant circuit with a frequency of 21 MHz, which coincides with the Larmor frequency for protons. In air, the circuit has only concentrated inductance and interturn capacitance. The latter is small and comparable to the parasitic capacitances of the environment. Because of this, the frequency of the circuit is very high, and its resonant resistance is unacceptably high. In water, the value of the interturn capacitance increases 80 times (by the value of the dielectric constant of water), which determines the value of the capacitance necessary for a resonant circuit with a frequency of 21 MHz. In this work, the solenoid is used as a wireless coil, inductively coupled to a wired one, which makes it possible to amplify the NMR signal in a small area determined by the dimensions of the wireless coil. As a result, images were obtained demonstrating the effect of a significant (up to 4 times) amplification of the NMR signal inside the solenoid compared to the signal outside it. The effect depends on the electrical conductivity of the water, and therefore appears only in clean (distilled) water. Otherwise, instead of increasing the signal inside the solenoid, it may decrease. Calculations of the parameters that determine the basic properties of a circuit based on a solenoid immersed in water are presented - the value of the distributed (interturn) capacitance, the mutual induction between the circuit and the wire coil, and the electrical conductivity of water. Good agreement between experimental and calculated data is noted. The possibility of studying objects immersed in water is being considered. In relation to wildlife objects, the problem of a possible decrease in the effectiveness of the method due to an increase in the electrical conductivity of water due to the presence of sodium ions involved in cellular processes is noted, and it is proposed to solve this problem by forcing the influx of distilled water into the area of interest.

Keywords

Resonant circuit, wireless coil, interturn capacitance, mutual induction, nuclear magnetic resonance, magnetic resonance imaging, electrical conductivity of water

For citation

Anisimov N.V., Pirogov Yu.A. Resonant properties of a solenoid immersed in water. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2024. V. 29. № 2. P. 44–54. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202402-05> (in Russian)

References

1. Flack F.C., James E.D., Schlapp D. Mutual Inductance of Air-Cored Coils: Effect on Design of Radio-Frequency Coupled Implants. *Medical and Biological Engineering and Computing*. 1971. V. 9. № 2. P. 79–85. DOI 10.1007/bf02474736.
2. Schnall M.D., Barlow C., Subramanian V.H., Leigh J.S. Wireless Implanted Magnetic Resonance Probes for in Vivo NMR. *Journal of Magnetic Resonance*. 1986. V. 68. № 1. P. 161–167. DOI 10.1016/0022-2364(86)90326-4.
3. Degen C. Inductive Coupling for Wireless Power Transfer and Near-field Communication. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2021. V. 2021. № 1. P. 1–20. DOI 10.1186/s13638-021-01994-4.
4. Gulyaev M.V., Pavlova O.S., Volkov D.V., Anisimov N.V., Pirogov Yu.A. Development and application of implant coils for obtaining MRI images with high spatial resolution. *Biomedicine Radioengineering*. 2018. № 4. P. 41–51. (in Russian)
5. Nohava L., Ginefri J.-C., Willoquet G., Laistler E., Frass-Kriegel R. Perspectives in Wireless Radio Frequency Coil Development for Magnetic Resonance Imaging. *Frontiers in Physics*. 2020. V. 8. P. 11. DOI 10.3389/fphy.2020.00011.
6. Anisimov N.V., Gervits L.L., Tarasova A.A., Usanov I.A., Pirogov Yu.A. MRI of Inanimate Objects Using Fluorine-Containing Liquid. *Applied Magnetic Resonance*. 2023. V. 54. P. 895–904. DOI 10.1007/s00723-023-01580-5.
7. Power Splitter/Combiner. [Electronic resource] – Access mode: <https://www.minicircuits.com/pdfs/PSCQ-2-21.4+.pdf>, date of reference 30.10.2023.
8. Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W. NIH Image to ImageJ: 25 Years of Image Analysis. *Nature Methods*. 2012. V. 9. № 7. P. 671–675. DOI 10.1038/nmeth.2089.
9. Perfluoro (2-methyl-3-pentanone). [Electronic resource] – Access mode: [https://en.wikipedia.org/wiki/Perfluoro\(2-methyl-3-pentanone\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Perfluoro(2-methyl-3-pentanone)), date of reference 30.10.2023.
10. Anisimov N.V., Tarasova A.A., Usanov I.A., Pavlova O.S., Gulyaev M.V., Pirogov Yu.A. Technological applications on a 0.5T clinical MRI scanner. *Proceedings 20th International School-Conference «Magnetic resonance and its applications»*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University. 2023. P. 51–54.
11. LC200A Handheld L/C Meter Inductance Capacitance Meter. User Manual. [Electronic resource] – Access mode: <http://mpl.jp/lc/LC200A%20%20EN%20V5.0.pdf>, date of reference 30.10.2023.
12. XWIN-NMR Software Manual. [Electronic resource] – Access mode: <https://www.pascal-man.com/pulseprogram/avance/xwinnmr-processing.pdf>, date of reference 30.10.2023.
13. Ramo S., Whinnery J.R., Van Duzer T. *Fields and Waves in Communication Electronics*. Third Edition. John Wiley & Sons, 1994. 844 p.
14. Medhurst R.G. HF Resistance and Self-Capacitance of Single-Layer Solenoids // *Wireless Engineer*. 1947. Feb. P. 35–43.
15. Medhurst R.G. HF Resistance and Self-Capacitance of Single-Layer Solenoids // *Wireless Engineer*. 1947. Mar. P. 80–92.
16. Knight D.W. The self-resonance and self-capacitance of solenoid coils: applicable theory, models and calculation methods. 2016. 105 p. DOI 10.13140/RG.2.1.1472.0887.
17. A table for selecting the resistivity of various types of soils and water. [Electronic resource] – Access mode: <https://ips-energo.ru/blog/tablitza-vybora-udelnogo-soprotivleniya-razlichnykh-tipov-gruntov-i-vody/>, date of reference 30.10.2023.

18. Distilled water. [Electronic resource] – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/Distilled_water, date of reference 30.10.2023.
19. Aliane K., Nasreddine B., Nadia B., Benkaddour A. Resonators support UHF MRI systems. *Microwaves and RF*. 2012. V. 51. № 4. P. 84–92.
20. Madelin G., Lee J.-S., Regatte R.R., Jerschow A. Sodium MRI: methods and applications. *Progress in Nuclear Magnetic Resonance and Spectroscopy*. 2014. V. 79. P. 14–47. DOI 10.1016/j.pnmrs.2014.02.001.

Information about the authors

Nikolay V. Anisimov – Dr.Sc. (Phys.-Math.), Senior Research Scientist

Yury A. Pirogov – Dr.Sc. (Phys.-Math.), Professor

The article was submitted 10.01.2024

Approved after reviewing 28.02.2024

Accepted for publication 26.03.2024

Журнал «БИОМЕДИЦИНСКАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА»

Главный редактор: академик РАН Юрий Васильевич Гуляев

Международный научно-прикладной журнал публикует статьи по биоматериаловедению, биомедицинским технологиям и взаимодействию физических полей и излучений с биологическими объектами, а также по разработке новых радиоэлектронных приборов для применения в биологии, биомедицинских технологиях и медицине.

Включен в состав базы *Russian Science Citation Index (RSCI)* на платформе *Web of Science*.

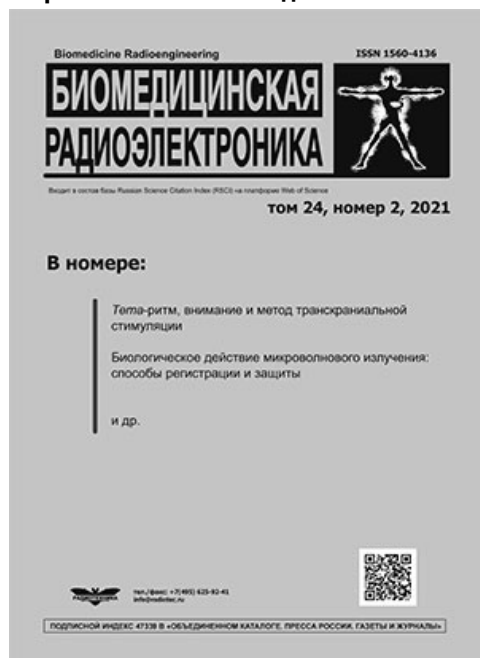
Включен в Перечень ВАК для научных периодических изданий, удовлетворяющих достаточному условию включения в Перечень

Выходит с 1998 г.

Периодичность: 6 номеров в год

ISSN: 1560-4136

«Пресса России» — индекс: 83820



Редакция журнала приглашает к сотрудничеству. Вы можете присылать статьи по следующим направлениям:

- Медицина
- Биотехнология
- Экология
- Механизмы биологических эффектов электромагнитных полей
- Эксперимент
- Устройства
- Фундаментальные проблемы медицины
- Новые биомедицинские технологии
- Электромагнитные поля и здоровье человека
- Теория и практика медицинских измерений

Научные специальности ВАК:

- 1.3.21. Медицинская физика
- 1.5.2. Биофизика
- 1.5.6. Биотехнология
- 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения

Подписаться на журналы, выпускаемые Издательством «Радиотехника» (см. 4-ю сторону обложки), можно с любого месяца и на любой срок непосредственно в Издательстве.