

пытаний были зафиксированы различные отклонения. Аналогичный процент отклонений фиксируется при проверке аппаратов для панорамной съемки – ортопантомографов.

Парк оборудования для проведения компьютерной рентгеновской томографии значительно увеличился за последние 5...7 лет за счет поставки в различные российские регионы современных многосрезовых спиральных систем. Часть этого оборудования еще находится на гарантийном обслуживании компаний-поставщиков, а часть – на постгарантийном обслуживании, за счет чего удается надежно поддерживать его в работоспособном состоянии, и выявление в процессе испытаний замечаний к отдельным параметрам и характеристикам КТ скорее исключение, нежели правило (менее 3 % случаев). Обычно эти замечания сводятся к необходимости проведения дополнительных калибровочных работ в тракте формирования (реконструкции) изображений и не касаются электрических, механических узлов, а также системы «излучатель – приемник изображения».

Объем проведенных периодических испытаний рентгенотерапевтического оборудования за анализируемый период времени невелик: общее количество испытаний составило 33 для пяти различных аппаратов. Данное оборудование, как правило, находилось в работоспособном состоянии.

Для удобства представления данные проведенных лабораторий эксплуатационных испытаний сведены в *табл. 1*.

Результаты проведенных в ЛПУ различных российских регионов эксплуатационных испытаний позволяют сделать вывод о том, что работоспособность и эффективность использования рентгенорадиологического оборудования в значительной степени гарантируются налаженным процессом его технического обслуживания. Это особенно наглядно иллюстрируют результаты испытаний наиболее сложного и соответственно наиболее дорогостоящего оборудования – ангиографических комплексов с цифровыми приемниками рентгеновского изображения и КТ. Получая данное оборудование, администрация ЛПУ, заинтересованная, в том числе и экономически, в его надежной, долговечной и бесперебойной

работе, как правило, уделяет серьезное внимание организации техобслуживания, что, наряду с проведением эксплуатационных испытаний в рамках производственного контроля, и обеспечивает качественную эксплуатацию. Также не стоит сбрасывать со счетов и другие виды испытаний, в особенности испытания на постоянство параметров. Проводимые с относительно небольшими интервалами времени, эти испытания наиболее «чувствительны» к возникающим в процессе эксплуатации оборудования проблемам и зачастую позволяют заблаговременно прогнозировать потенциальные отказы (например, скорое исчерпание ресурса рентгеновской трубки, на замену которой в ряде случаев потребуется немалое время).

Список литературы:

1. СанПиН 2.6.1.1192-03 Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований. Утверждены 14 февраля 2003 г.
2. Технический паспорт на рентгеновский диагностический кабинет. Утвержден 2 августа 2002 г.
3. Федеральный закон «Об аккредитации в национальной системе аккредитации» от 28.12.2013 г. № 412-ФЗ.

*Михаил Израилевич Зеликман,
д-р техн. наук, профессор,
кафедра рентгенологии и радиологии,
ФГБОУ ДПО «Российская медицинская
академия непрерывного профессионального
образования Минздрава РФ»,
Сергей Александрович Кручинин,
канд. техн. наук, директор,
Денис Владимирович Михеев,
инженер,
ООО «Конструкторское бюро РентгенТест»,
г. Москва,
e-mail: miz2004@rambler.ru*

Р.Р. Аубакиров, А.А. Данилов

Влияние формы антенн на пропускную способность канала беспроводного обмена данными для безаккумуляторных имплантатов

Аннотация

Проведена оценка влияния формы приемной и передающей антенн на коэффициент усиления по напряжению и ширину полосы пропускания беспроводного канала обмена данными и передачи энергии в системе индуктивной передачи энергии. Сравнение проводилось для пар антенн с круглыми и квадратными витками. Показано, что использование квадратных антенн обеспечивает более высокую стабильность коэффициента усиления по напряжению и более широкую полосу пропускания беспроводного канала.

Введение

Применение систем индуктивной передачи энергии (ИПЭ) является альтернативой использованию чрескожных проводов при энергообеспечении имплантируемых медицинских приборов (ИМП) [1]-[4]. Одним из важных достоинств систем ИПЭ является возможность совмещения канала беспроводной передачи энергии с каналом беспроводной передачи информации посредством модуляции сигнала [4], [5]. В этом случае пара катушек индуктивности выполняет также функцию приемопередающих антенн. Одним из преимуществ такого подхода перед альтернативными решениями (например использованием дополнительной пары антенн) является уменьшение массогабаритных характеристик системы, что особенно важно в случае имплантируемых в тело человека приборов. К числу акту-

альных задач для развития упомянутого подхода можно отнести расширение полосы пропускания беспроводного канала, а также увеличение коэффициента усиления выходного сигнала.

Эффективным способом оптимизации параметров системы ИПЭ с целью улучшения характеристик системы является подстройка геометрических параметров антенной пары [6]-[8]. Одним из возможных способов подстройки является подбор оптимального форм-фактора катушек. Широкое распространение в системах ИПЭ получили катушки с круговыми витками, тем не менее перспективным представляется использование катушек с квадратными витками [9]-[11]. Также стоит отметить, что размеры области имплантации ИМП строго ограничены, поэтому существует необходимость в использовании имеющегося пространства с максимальной эффективностью.

Целью рассматриваемой работы было сравнение стабильности работы, величины коэффициента усиления по напряжению, а также ширины полосы пропускания системы ИПЭ с объединенным каналом передачи энергии и информации для катушечных пар с круглыми и квадратными витками. Считалось, что катушки обоих типов помещаются в квадратные корпуса равных размеров и заполняют ограниченную площадь.

Материалы и методы

Исследование проводилось с использованием разработанного авторами ранее аппарата численного моделирования процессов чрескожной беспроводной передачи энергии [8], [12], [13]. Объектом моделирования являлась система ИПЭ с последовательной компенсацией реактивной мощности в передающей и принимающей частях системы. Условия моделирования соответствовали работе вблизи так называемой точки критической связи. В этой точке, соответствующей некоторому наперед заданному взаимному положению катушек (в частном случае – наперед заданному осевому расстоянию), система ИПЭ обеспечивает максимально возможную выходную мощность и коэффициент усиления по напряжению.

Расчет коэффициента усиления по напряжению выполнялся на основе вычисления взаимной индуктивности катушек. Взаимная индуктивность может быть вычислена на основе численного интегрирования формулы Неймана. Для круглых катушек соответствующее выражение принимает следующий вид [13]:

$$M_r = \frac{\mu_0 \pi}{NK} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K r_T r_R \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{\cos(\varphi_{T_i} - \varphi_{R_j})}{R_{ij}}, \quad (1)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; r_T и r_R – радиусы катушек; R_{ij} – расстояние между элементами витков; I и J – число элементов витков; N и K – число витков.

$$\begin{cases} R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2}; \\ x_i - x_r = r_T \cos \varphi_{T_i} - r_R \cos \varphi_{R_j}; \\ y_i - y_r = r_T \sin \varphi_{T_i} - r_R \sin \varphi_{R_j}; \\ z_i - z_r = d, \end{cases} \quad (2)$$

где d – расстояние между катушками; φ_T и φ_R – углы между плоскостями элементов.

Для квадратных катушек было получено следующее выражение:

$$M_s = \frac{4\mu_0}{IJ\pi} \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K a_T a_R \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{\cos(\alpha)}{R_{ij}}, \quad (3)$$

$$R_{ij} = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i - y_r)^2 + (z_i - z_r)^2}, \quad (4)$$

где α – угол между элементами витков; a_T и a_R – размеры сторон катушек. Поиск координат для квадратных катушек описан в статье [12].

Коэффициент усиления по напряжению рассчитывался при помощи следующего выражения:

$$G_v = \frac{j\omega M R_L}{Z_T Z_R + \omega^2 M^2}, \quad (5)$$

где ω – круговая рабочая частота; R_L – нагрузочное сопротивление; Z_T и Z_R – импедансы передающей и принимающей частей системы, которые в случае последовательной компенсации реактивной мощности описываются следующими выражениями:

$$Z_T = j\omega L_T + \frac{1}{j\omega C_T} + R_T; \quad (6)$$

$$Z_R = j\omega L_R + \frac{1}{j\omega C_R} + R_L, \quad (7)$$

где C_T – емкость передающей части системы; C_R – емкость принимающей части системы; R_T – сопротивление передающей части.

Для определения расстояния между катушками, соответствующего критической связи, необходимо вычислить величину коэффициента критической связи по формуле

$$k_{crit} = \frac{1}{\sqrt{Q_T Q_R}}, \quad (8)$$

где Q_T и Q_R – добротности передающей и принимающей частей системы.

После этого необходимо получить зависимость коэффициента связи от расстояния между катушками с использованием следующего выражения:

$$k(d) = \frac{M(d)}{\sqrt{L_T L_R}}, \quad (9)$$

где M – взаимная индуктивность передающей и принимающей катушек; L_T – собственная индуктивность передающей катушки; L_R – собственная индуктивность принимающей катушки; d – осевое расстояние между катушками.

Расстояние между катушками d_{crit} , соответствующее точке критической связи, определяется из соотношения

$$k(d_{crit}) = k_{crit}. \quad (10)$$

Для расчета выходных амплитудно-частотных характеристик системы ИПЭ были использованы параметры, приведенные в табл. 1. В процессе моделирования выполнялся расчет коэффициента усиления по напряжению в зависимости от осевого смещения катушек. Диаметр внешнего витка круглых катушек был равен внешней стороне внешнего витка квадратных катушек и составлял 25 мм. Диаметр внутреннего витка был равен длине стороны внутреннего витка и составлял 5 мм. Сопротивление передающей части системы и сопротивление нагрузки было равно 10 Ом. Номинал конденсаторов в обеих частях системы составлял 45 пФ.

Таблица 1

Параметры моделируемых систем

Параметр	Квадратные катушки		Круглые катушки	
	3	9	3	9
$N = K$	3	9	3	9
$L_T = L_R$, мкГн	0,13	1,20	0,12	1,06
$f = \omega / 2\pi$, МГц	65,1	21,7	69,1	23
k_{crit}	0,184	0,061	0,195	0,065

Результаты

Зависимость коэффициента связи от осевого смещения (рис. 1) имеет одинаковый характер как для квадратных, так и для круглых катушек. При этом коэффициент связи катушек с квадратными витками существенно выше.

Результаты расчета коэффициента усиления по напряжению для двух типов катушек при одинаковых номиналах компенсирующих емкостей показаны на рис. 2а. В этом случае величина осевых смещений, на которой наблюдается критическая связь, для квадратных катушек превышает аналогичную величину смещений для круглых катушек на 15...17%. На рис. 2б представлены результаты расчета коэффициента усиления по напряжению для случая, когда емкости и рабочая частота в системе с квадратными катушками были подстроены таким образом, чтобы осевое смещение, на котором наблюдается критическая связь, совпадало для двух типов катушек ($C_T = C_R = 66,7$ пФ и $f = 53,4$ МГц – для 3 витков; $C_T = C_R = 81,3$ пФ и $f = 16,1$ МГц – для 9 витков). Для системы с квадратными катушками характерен меньший перепад коэффициента усиления по напряжению при изменении величины осевых смещений.

На рис. 3 представлена зависимость коэффициента усиления по напряжению от рабочей частоты системы для круглых и квадратных катушек с числом витков 9 для расстояния между катушками 5 и 8 мм. Моделирование выполнялось после так называемой широкополосной подстройки системы ИПЭ [5]. Емкости были подобраны таким образом, чтобы обеспечить одинаковую частоту резонанса для систем ИПЭ с круглыми и квадратными катушками. Далее эти емкости были подстроены таким образом, чтобы расширить полосу пропускания беспроводного канала ($C_{Tr} = 67,5$ пФ; $C_{Rr} = 45$ пФ; $C_{Ts} = 60$ пФ; $C_{Rs} = 40$ пФ). На рис. 3 видно, что ширина диапазона рабочих частот в случае системы ИПЭ с квадратными катушками превышает аналогичную ширину в системе с круглыми катушками, при этом обеспечивая более высокий коэффициент усиления по напряжению.

Выводы

В системах индуктивной передачи энергии при использовании катушек разной формы, но имеющих одинаковые характерные размеры (диаметр внешнего/внутреннего круглого витка, длина стороны внешнего/внутреннего квадратного витка), величина коэффициента критической связи оказывается близка. Однако ввиду того, что характер зависимости взаимной индуктивности и коэффициента связи от величины смещений для двух типов катушек отличается, критическая связь наблюдается при разной величине смещений катушек в случае одинаковой емкости компенсирующих конденсаторов. Большее значение коэффициента связи в системе ИПЭ с квадратными катушками приводит к тому, что точка критической связи наблюдается при большем расстоянии между катушками.

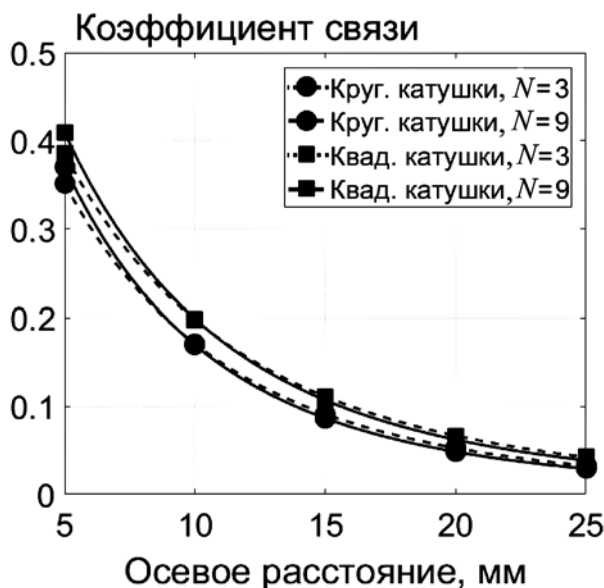


Рис. 1. Зависимость коэффициента связи от осевого расстояния квадратных и круглых катушек (пунктирная линия – 3 витка, сплошная – 9 витков)

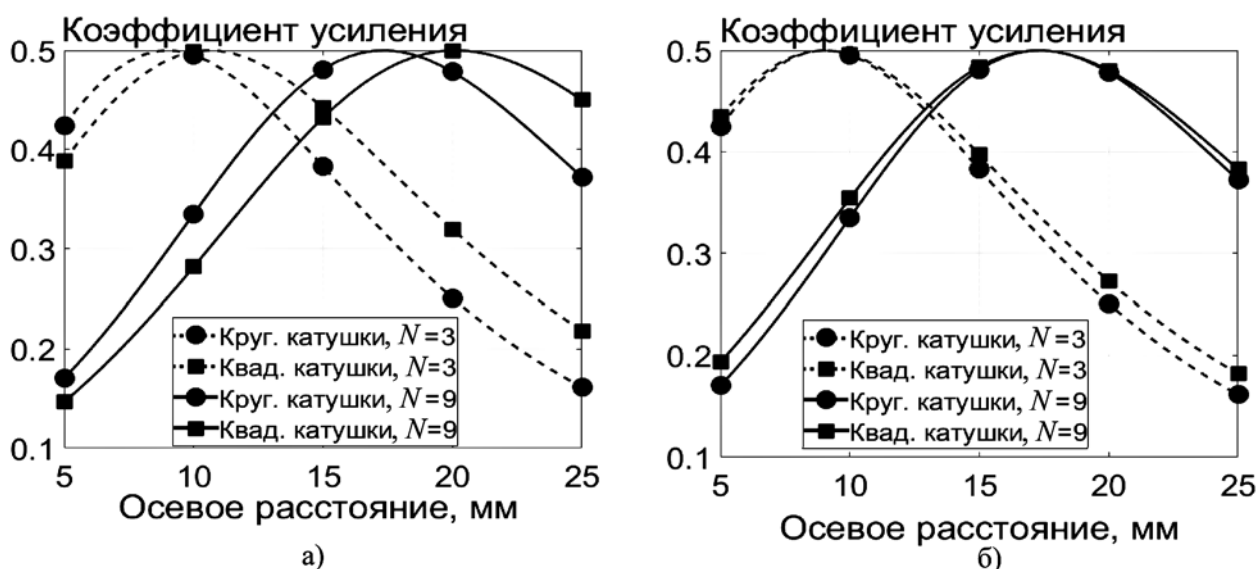


Рис. 2. Зависимость коэффициента усиления от осевого смещения круглых и квадратных катушек с 3 (пунктирная линия) и 9 (сплошная линия) витками: а) номиналы конденсаторов совпадают; б) конденсаторы подстроены для совпадения величины осевого смещения, на котором наблюдается критическая связь

В случае подстройки параметров системы ИПЭ таким образом, чтобы величина смещений, на которой наблюдается критическая связь, совпала для круглых и квадратных катушек, система с квадратными катушками обеспечивает более высокую стабильность коэффициента усиления по напряжению при изменении величины осевых смещений. При этом использование в системе катушек с квадратными витками позволяет добиться более широкой полосы пропускания беспроводного канала обмена данными по сравнению с использованием круглых катушек.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы»). Соглашение № 14.579.21.0144, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57917X0144.

Список литературы:

1. *Amar A.B., Kouki A.B., Cao H.* Power Approaches for Implantable Medical Devices // *Sensors*. 2015. Vol. 15. № 11. PP. 28889-28914.
2. *Agarwal K., Jegadeesan R., Guo Y.X., Thakor N.V.* Wireless power transfer strategies for implantable bioelectronics: Methodological review // *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. In press.
3. *Nopper R., Has R., Reindl L.* A Wireless Sensor Readout System – Circuit Concept, Simulation, and Accuracy // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2011. Vol. 60. № 8. PP. 1-8.
4. *RamRakhyani A.K.* On the Design of Efficient Multi-Coil Telemetry System for Biomedical Implants // *IEEE Transactions of Biomedical Circuits and Systems*. 2012. Vol. 7. № 1. PP. 11-23.
5. *Galbraith D.C., Soma M., White R.L.* A Wide-Band Efficient Inductive Transdermal Power and Data Link with Coupling Insensitive Gain // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1987. Vol. 34. № 4. PP. 265-275.

6. *Bosshard R., Muhlethaler J., Kolar J.W., Stevanovic I.* Optimized magnetic design for inductive power transfer coils / 28th IEEE APEC. 2013. PP. 1812-1819.
7. *Zierhofer C.M., Hochmair E.S.* Geometric approach for coupling enhancement of magnetically coupled coils // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1996. Vol. 43. № 7. PP. 704-714.
8. *Danilov A.A., Mindubaev E.A., Selishchev S.V.* Design and Evaluation of an Inductive Powering Unit for Implantable Medical Devices Using GPU Computing // *Progress in Electromagnetics Research B*. 2016. Vol. 69. PP. 61-73.
9. *Jow U., Ghovanloo M.* Design and optimization of printed spiral coils for efficient transcutaneous inductive power transmission // *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*. 2007. Vol. 1. № 3. PP. 193-202.
10. *McDonough M., Fahimi B.* Comparison between circular and square coils for use in Wireless Power Transmission / *CEM 2014*. PP. 1-2.
11. *Ezhil R.J., Ankit D., Praveen K.* Accurate Computation of Mutual Inductance of Two Air Core Square Coils with Lateral and Angular Misalignments in a Flat Planar Surface // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014. Vol. 50. № 1. PP. 1-9.
12. *Аубакиров П.П.* Численное моделирование индуктивной чрескожной беспроводной передачи энергии с помощью катушек с квадратными витками / Сборник статей «Микроэлектроника и информатика-2017». 2017. С. 8-13.
13. *Данилов А.А., Миндубаев Э.А.* Влияние угловых смещений катушек на эффективность чрескожной беспроводной передачи энергии при помощи индуктивной связи // *Медицинская техника*. 2015. № 3. С. 33-35.

Рафаэль Рафаэльевич Аубакиров,
инженер,

Арсений Анатольевич Данилов,
канд. физ.-мат. наук, ст. научный сотрудник,
АО «ЗИТЦ»,
г. Зеленоград,
e-mail: rafael1994@mail.ru

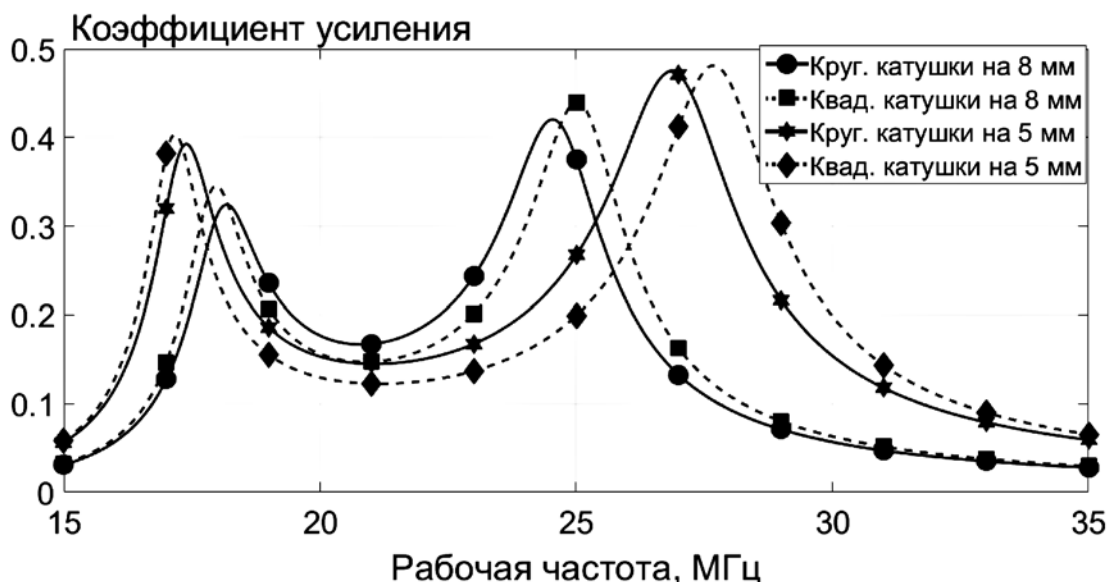


Рис. 3. Зависимость коэффициента усиления по напряжению от рабочей частоты системы индуктивной передачи энергии для квадратных и круглых катушек с числом витков, равном 9, на расстоянии 5 и 8 мм