УДК 621.375

проектирование и математическое моделирование электронных систем индуктивного питания имплантатов с повышенной устойчивостью к изменению условий эксплуатации

*Данилов Арсений Анатольевич, к.ф.-м.н доцент, доцент,1*[*arseny.danilov@gmail.com*](mailto:morozov@infway.ru)

*1 Национальный исследовательский университет МИЭТ, г.Зеленоград, Москва*

Аннотация: рассмотрены основные подходы к проектированию и математическому описанию работы систем индуктивного питания имплантатов с целью повышения устойчивости таких систем к изменению условий эксплуатации.

Ключевые слова: метод конечных элементов, численное интегрирование, силовая электроника, имплантируемые электронные системы.

Введение

Одним из наиболее важных направлений развития современной имплантируемой медицинской электроники является совершенствование систем индуктивного питания имплантатов, однако наличие ряда нерешённых проблем мешает широкому их внедрению [1]. Одной из таких проблем является изменение условий эксплуатации: изменение толщины слоя биологической ткани, разделяющей приёмную и передающую катушки; смещения передающей катушки относительно принимающей; изменения температуры тела. Это делает актуальной разработку методов проектирования и математического описания устойчивых к изменению условий эксплуатации систем.

Описание индуктивной связи произвольно ориентированных в пространстве катушек индуктивности

Ключевой физической величиной, описывающей связь пары LC-контуров, является взаимная индуктивность. Эта величина может быть получены на основе решений уравнений Максвелла численными методами, и такая возможность реализована в существующих прикладных пакетах физического моделирования. Недостатком такого подхода является усложнение процедур проектирования при необходимости параметрического анализа и итерационного подбора конструктивных характеристик.

Альтернативой такому подходу может быть численное интегрирование так называемой формулы Неймана для вычисления взаимной индуктивности [3]. Использование численного интегрирования позволяет проводить параметрический анализ в процессе проектирования. В ряде случаев объём вычислений оказывается достаточно большим для того, чтобы оправданным было использование параллельных вычислений. Для решения этой проблемы был разработан алгоритм, использующий программно-аппратную архитектуру CUDA [2].

Алгоритмизация проектирования систем индуктивного питания имплантатов с повышенной устойчивостью

На основе метода численного интегрирования была разработана группа алгоритмов для оптимизации конструкции катушечных пар в составе систем индуктивного питания имплантатов. Целью алгоритмов является получение конструкций катушек индуктивности, обеспечивающих заданную устойчивость системы (отклонение выходной мощности от номинального значения не превышает заданного) в заданном диапазоне смещений катушек индуктивности. В основу алгоритма положена итерационная процедура подбора конструктивных характеристик для достижения заданной устойчивости на основе вычисления взаимной индуктивности. Было показано, что разработанные алгоритмы позволяют обеспечить относительно высокую устойчивость систем: перепад мощности ±10% при боковых смещениях, достигающих величины радиуса принимающей катушки индуктивности [3].

Метод быстрой оценки тепловой безопасности

Для оценки тепловой безопасности обычно используют численные решения т.н. уравнения Пеннеса. Существенным недостатком такого подхода при проектировании является необходимость повторения расчётов для каждого нового варианта конструкции. Можно предложить метод быстрой оценки изменения характеристик нагрева при изменении конструкции на основе на линейной аппроксимации расчётов для двух вариантов конструкции. Было показано, что линейная аппроксимация в пределах физиологического диапазона температур (36...42 °С) позволяет оценивать ожидаемый нагрев тканей с ошибкой 0,2..0,5 °С [4].

Выводы

Итерационные процедуры проектирования требуют использования относительно простых математических моделей, позволяющих предсказывать изменение характеристик системы при изменении условий эксплуатации. Для систем индуктивного питания имплантатов такие модели могут быть построены либо на основе численного интегрирования формулы Неймана (для предсказания изменения мощностных характеристик) или на основе линейной аппроксимации расчётов на основе метода конечных элементов (для предсказания характеристик нагрева).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российской Федерации в лице Минобрнауки России в рамках крупного научного проекта по соглашению № 075-15-2024-555 от 25.04.2024 г.

Список использованных источников

1. Danilov, A.A., Mindubaev, E.A. & Selishchev, S.V. Methods for Compensation of Coil Misalignment in Systems for Inductive Transcutaneous Power Transfer to Implanted Medical Devices. Biomed Eng 51, 56–60 (2017).

2. 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. – P. 61-73.

3. Danilov A.A., Aubakirov R.R., Mindubaev E.A., Gurov K.O., Telyshev D.V., Selshchev S.V. An Algorithm for the Computer Aided Design of Coil Couple for a Misalignment Tolerant Biomedical Inductive Powering Unit // IEEE Access, 2019. – Vo. 7. – P. 70755-70769.

4. Ryabchenko, E.V., Mindubaev, E.A. & Danilov, A.A. Rapid Assessment of the Thermal Safety of Low-Frequency Inductive Power Transfer Systems for Implantable Devices. Biomed Eng 56, 185–189 (2022).

DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING OF ELECTRONIC INDUCTIVE POWER SUPPLY SYSTEMS FOR IMPLANTS WITH INCREASED STABILITY TO CHANGING OPERATING CONDITIONS

A.A. Danilov

Abstract: the main approaches to the design and mathematical description of the operation of inductive power supply systems for implants are considered in context of improving the tolerance of such systems to changing operating conditions..

Key words: finite elements method, numerical integration, power electronics, implantable electronic systems.