

## Влияние сопротивления нагрузки и коэффициента связи катушек на устойчивость системы чрескожной индуктивной передачи энергии с емкостной подстройкой

### Аннотация

Исследована система чрескожной индуктивной передачи энергии (ЧИПЭ) к имплантируемым медицинским приборам (ИМП). Для поддержания постоянной выходной мощности к ИМП в передающей части системы используется усилитель мощности класса Е с динамической подстройкой номиналов конденсаторов. Было изучено влияние режимов работы ИМП на величину постоянной выходной мощности системы ЧИПЭ, а также на устойчивость предложенной системы к смещениям передающей и принимающей катушек. Установлено, что зависимость диапазона выходной мощности системы ЧИПЭ, который определяет достижимые значения постоянной выходной мощности, от смещения катушек имеет форму кривой с локальным максимумом. При этом положение локального максимума зависит от режима работы ИМП (эквивалентной нагрузки системы ЧИПЭ), а предельное значение максимума совпадает для различных режимов работы ИМП.

### Введение

Системы чрескожной индуктивной передачи энергии (ЧИПЭ) широко используются для энергообеспечения таких имплантируемых медицинских приборов (ИМП), как, например, нейростимуляторы, ретинальные и кохлеарные имплантаты, а также аппараты вспомогательного кровообращения [1]-[4]. В передающей части таких систем может использоваться усилитель мощности (УМ) класса Е, так как он обладает высокой эффективностью преобразования постоянного тока в переменный (до 100 %) [5], [6]. В то же время УМ класса Е чувствителен к смещениям передающей и принимающей катушек системы, возникающих при движениях пациента или, например, при изменении состояния тканей после имплантации ИМП. Смещения приводят к изменению выходной мощности и к уменьшению общей эффективности системы [7], поэтому решение проблемы компенсации этих смещений имеет особое значение для УМ класса Е в составе системы ЧИПЭ. Одним из вариантов увеличения устойчивости системы к изменению положения катушек является использование динамической подстройки номиналов конденсаторов в нагрузочной цепи УМ класса Е [8].

Помимо смещений передающей и принимающей катушек, на работу системы ЧИПЭ также оказывает влияние сам ИМП. При смене режима его работы изменяется эквивалентная нагрузка системы ЧИПЭ, что также приводит к немонотонному изменению выходной мощности и уменьшению эффективности системы. В связи с этим в статье исследуется влияние сопротивления нагрузки и коэффициента связи, который описывает смещение передающей и принимающей катушек, на выходную мощность системы ЧИПЭ с УМ класса Е с емкостной подстройкой.

### Материалы и методы

Принципиальная схема системы ЧИПЭ с емкостной подстройкой представлена на рис. 1. Система состоит из передающей и принимающей частей. Передающая часть представляет собой УМ класса Е, который включает в себя дроссель  $L_C$ , пропускающий только постоянную составляющую напряжения от источника питания  $V_S$ , ключевой полевой транзистор (или ключ)  $S$ , на вход которого подается сигнал от импульсного источника  $V_G$ , а также нагрузочную цепь. В свою очередь, нагрузочная цепь УМ состоит из передающей катушки  $L_T$ , а также из шунтирующего  $C_P$  и последовательного  $C_S$  конденсаторов. Принимающая часть системы ЧИПЭ включает в себя принимающую катушку  $L_R$ , нагрузку  $R_{LOAD}$ , а также конденсатор  $C_R$ , благодаря которому реактивная мощность уменьшается до нуля для обеспечения резонанса в приемнике. Передающая и принимающая части системы ЧИПЭ работают на одинаковой рабочей частоте  $f$ . Емкость компенсирующего конденсатора  $C_R$ , подключенного к принимающей катушке  $L_R$

последовательно, можно рассчитать при помощи формулы Томсона

$$C_R = \frac{1}{\omega^2 L_R},$$

где  $L_R$  – собственная индуктивность принимающей катушки;  $\omega = 2\pi f$  – угловая рабочая частота системы ЧИПЭ.

Влияние относительного положения передающей  $L_T$  и принимающей  $L_R$  катушек на работу системы ЧИПЭ можно описать при помощи коэффициента связи  $k$ . Величина коэффициента связи зависит как от геометрических параметров катушек, так и от характера и величины их смещения.

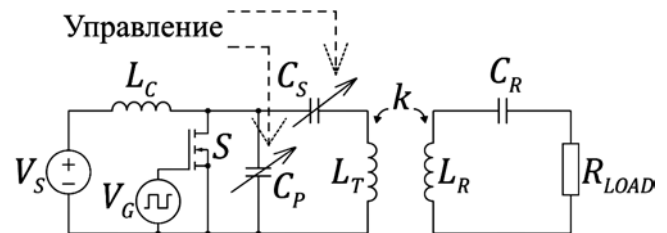


Рис. 1. Принципиальная схема системы ЧИПЭ, в которой смещения катушек  $L_T$  и  $L_R$  компенсируются динамической подстройкой конденсаторов  $C_P$  и  $C_S$  в нагрузочной цепи УМ класса Е

Для компенсации эффекта смещения катушек системы ЧИПЭ проводится емкостная подстройка, которая заключается в динамической регулировке номиналов конденсаторов  $C_P$  и  $C_S$  в нагрузочной цепи УМ класса Е. В результате подстройки в УМ соблюдается условие переключения при нулевом напряжении (ПНН). При заданном коэффициенте связи (или при фиксированном положении катушек) возможно определить несколько пар конденсаторов в нагрузочной цепи УМ, при которых соблюдается ПНН. Как следствие, для этого значения коэффициента возможно рассчитать диапазон выходных мощностей. Диапазон выходных мощностей  $\Delta P_{LOAD}$  представляет собой разницу между максимальной  $P_{LOADMAX}$  и минимальной  $P_{LOADMIN}$  выходными мощностями при заданном коэффициенте связи  $k$  и рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta P_{LOAD} = P_{LOADMAX} - P_{LOADMIN}.$$

Примеры диапазонов выходной мощности  $\Delta P_{LOAD}$  для осевых смещений катушек 15 и 20 мм показаны на рис. 2 вертикальными серыми линиями.

В результате емкостной подстройки в системе ЧИПЭ возможно выделить такие значения выходной мощности, которые система способна поддерживать при изменении коэффициента связи передающей и принимающей катушек. Иначе говоря, в этом случае определяется диапазон постоянных вы-

ходных мощностей, который выделен на *рис. 2* штриховкой. Верхняя и нижняя границы диапазона, в котором можно установить постоянную выходную мощность, соответствуют минимуму верхней границы  $P_{MAXMIN}$  и максимуму нижней границы  $P_{MINMAX}$  диапазона выходной мощности.

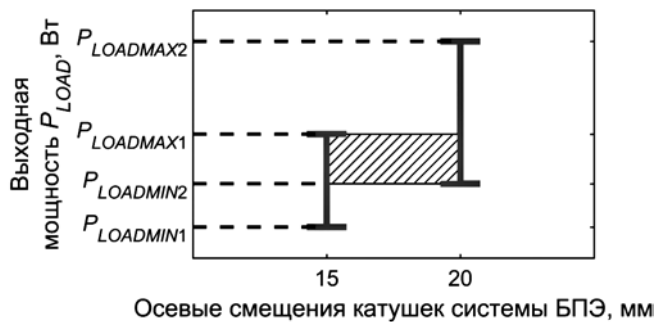


Рис. 2. Выходные мощности системы ЧИПЭ при осевых смещениях передающей и принимающей катушек 15 и 20 мм. Серыми вертикальными линиями показаны диапазоны выходной мощности при каждом смещении, штриховкой выделен диапазон, в границах которого можно установить постоянную выходную мощность. Мощности  $P_{MINMAX}$  и  $P_{MAXMIN}$  соответствуют  $P_{LOADMAX1}$  и  $P_{LOADMIN2}$

При проведении емкостной подстройки в системе ЧИПЭ дополнительно необходимо соблюдать несколько условий, одним из которых является высокая добротность нагрузочной цепи УМ класса Е [6]. В случае высокой добротности выходные сигналы тока и напряжения близки к синусоиде. Добротность  $Q$  нагрузочной цепи УМ класса Е в составе системы ЧИПЭ рассчитывается по следующей формуле:

$$Q = \frac{\omega L_T}{R_T + Z_{REF}},$$

где  $R_T$  — эквивалентное сопротивление передающей катушки  $L_T$ ;  $Z_{REF}$  — отраженный импеданс, который характеризует влияние принимающей части системы ЧИПЭ на передающую и определяется как

$$Z_{REF} = \frac{(\omega M)^2}{Z_R},$$

где  $M = k(L_T L_R)^{1/2}$  — взаимдуктивность передающей  $L_T$  и принимающей  $L_R$  катушек при коэффициенте связи  $k$ ;  $Z_R$  — импеданс приемника при последовательной компенсации реактивной мощности, который рассчитывается как

$$Z_R = \omega L_R + R_R + \frac{1}{\omega C_R} + R_{LOAD},$$

где  $R_R$  — эквивалентное сопротивление принимающей катушки  $L_R$ ;  $R_{LOAD}$  — сопротивление нагрузки.

## Результаты

Система ЧИПЭ с УМ класса Е в передающей части была промоделирована в программе *LTSpice*. В качестве ключа УМ использовался МОП-транзистор *irf8707*, на вход которого подавался прямоугольный сигнал с частотой 880 кГц и рабочим циклом 50 %. Напряжение источника питания и собственная индуктивность дросселя составили 5 В и 100 мкГн соответственно. Собственная индуктивность передающей катушки в нагрузочной цепи УМ составила 1,92 мкГн при эквивалентном сопротивлении 0,14 Ом. Индуктивность и сопротивление были рассчитаны методом конечных разностей при внешнем и внутреннем радиусах катушки 20 и 3,5 мм, количестве витков, равном 12, расстоянии между центрами витков 1,5 мм, а также при диаметре поперечного сечения провода 0,5 мм. В свою очередь, емкости шунтирующего и последовательного конденсаторов регулировались в зависимости от величины коэффициента связи для обеспечения условия ПНН в УМ. Катушка индуктивности в принимающей части системы ЧИПЭ имела те же параметры, что и передающая катушка. Емкость компенсирующего конденсатора в приемнике составила 17 нФ при нагрузках с сопротивлениями 20, 40, 60 и 80 Ом. Выбранные значения сопротивлений позволяют подробно рассмотреть работу ИМП в различных режимах.

В ходе моделирования было выявлено, что минимально возможная выходная мощность системы ЧИПЭ во всех случаях увеличивалась при увеличении коэффициента связи передающей и принимающей катушек. Так как при малых значениях коэффициента связи возможно значительное увеличение потерь мощности на ключе УМ, для всех рассматриваемых сопротивлений нагрузки были установлены нижние границы диапазонов выходных мощностей, которые в каждом случае составили 0,5 Вт. Таким образом, в работе были более подробно исследованы верхние границы диапазонов мощности для каждого из рассматриваемых сопротивлений нагрузки. На *рис. 3* представлены зависимости максимальной выходной мощности от величины коэффициента связи при нагрузках 20...80 Ом. В ходе исследования коэффициент связи изменялся в диапазоне 0...0,5 с шагом 0,025. По *рисунку* видно, что во всех случаях при исследовании зависимостей возможно выделить локальный максимум. Как правило, чем больше сопротивление нагрузки, тем при большем коэффициенте связи возникает этот максимум. Так, при сопротивлении нагрузки 20 Ом локальный максимум наблюдается при коэффициенте связи 0,2, в то время как при нагрузке 40 Ом он возникает при коэффициенте связи 0,25. Соответственно при нагрузках 60 и 80 Ом локальные максимумы наблюдаются при коэффициентах свя-

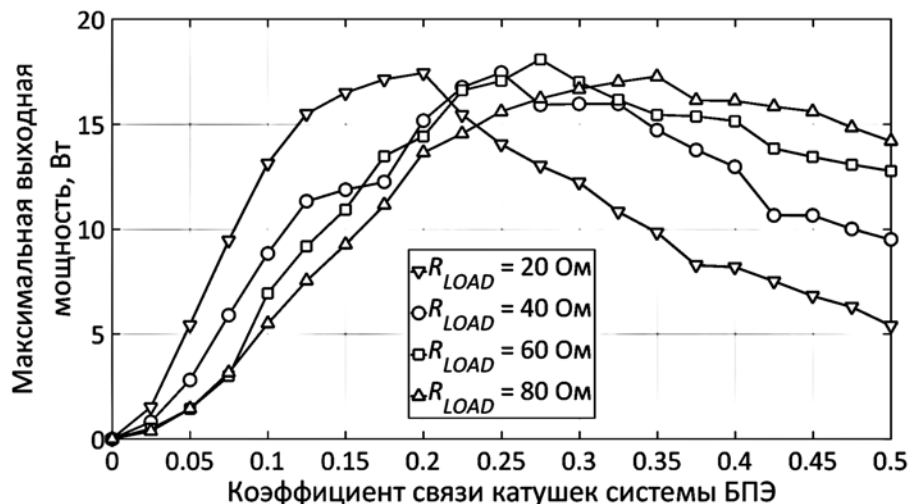


Рис. 3. Зависимости максимальной выходной мощности системы ЧИПЭ от коэффициента связи при различных сопротивлениях нагрузки  $R_{LOAD}$ . В ходе исследования коэффициент связи изменялся в диапазоне 0...0,5 с шагом 0,025

зи 0,275 и 0,35. При этом по рис. 3 видно, что при увеличении сопротивления нагрузки поиск локального максимума усложняется. Одной из причин может являться относительно большой шаг изменения коэффициента связи в ходе исследования. Рассчитанные локальные максимумы при сопротивлениях нагрузки 20...80 Ом приблизительно одинаковы и находятся в диапазоне 17,26...18,07 Вт.

### Заключение

Исследовано влияние смещений передающей и принимающей катушек на устойчивость системы ЧИПЭ при различных режимах работы ИМП. Смещения катушек можно описать при помощи коэффициента связи, в то время как различным режимам работы ИМП соответствуют разные сопротивления нагрузки системы ЧИПЭ. При заданном положении катушек возможно рассчитать диапазон выходных мощностей, величина которого, как правило, зависит от верхней границы. Для каждого режима работы ИМП при исследовании верхней границы диапазона выходных мощностей возможно выделить локальный максимум. Как правило, чем больше сопротивление нагрузки, тем при большем коэффициенте связи находится этот максимум. Однако с ростом сопротивления нагрузки выходная мощность изменяется все более плавно, что усложняет поиск локального максимума. Также стоит отметить, что величины рассчитанных максимумов приблизительно одинаковы и подбор конденсаторов с более высокой точностью позволит уменьшить разницу между максимумами.

*Работа выполнена в рамках государственного задания, соглашение № 075-03-2020-216 от 27.12.2019 г.*

### Список литературы:

1. Eldridge P., Simpson B.A., Gilbert J. The role of rechargeable systems in neuromodulation // *European Neurological Review*. 2011. Vol. 6. № 3. PP. 187-192.
2. Li X., Yang Y., Gao Y. Visual prosthesis wireless energy transfer system optimal modeling // *Biomedical Engineering Online*. 2014. Vol. 13. № 3. PP. 1-11.

3. Zeng F.-G., Rebscher S., Harrison W., Sun X., Feng H. Cochlear implants: System design, integration, and evaluation // *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2008. Vol. 1. PP. 115-142.
4. Danilov A.A., Itkin G.P., Selishchev S.V. Progress in methods for transcutaneous wireless energy supply to implanted ventricular assist devices // *Biomedical Engineering*. 2010. Vol. 44. № 4. PP. 125-129.
5. Sokal N.O. Class-E RF power amplifiers // *QEX*. 2001. Vol. 202. № 1. PP. 9-20.
6. Liu H., Shao Q., Fang X. Modeling and optimization of class-E amplifier at subnominal condition in a wireless power transfer system for biomedical implants // *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*. 2017. Vol. 11. № 1. PP. 35-43.
7. Surkov O.A., Danilov A.A., Mindubaev E.A. An algorithm for designing AC generators for inductive powering systems of batteryless implants // *Biomedical Engineering*. 2019. Vol. 52. № 5. PP. 331-334.
8. Mindubaev E.A., Selyutina E.V., Danilov A.A. Tuning of class E power amplifier for compensating the effect of the receiver coil implantation depth on the operation of a wireless transcutaneous energy transfer system // *Biomedical Engineering*. 2020. Vol. 54. № 4. PP. 258-261.

*Елена Викторовна Селютина,  
инженер,*

*Константин Олегович Гуров,  
инженер,*

*Эдуард Адипович Миндубаев,  
канд. техн. наук, доцент,*

*Арсений Анатольевич Данилов,  
канд. физ.-мат. наук, доцент,*

*Институт биомедицинских систем,*

*ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский*

*университет «Московский институт электронной техники»,*

*г. Москва, г. Зеленоград,*

*e-mail: constantinegurov@yandex.ru*

*А.В. Тараканов, А.А. Тараканов, С.А. Чеботов, В.В. Ефремов*

## Возможности компьютерной стабилотрии на четырехопорном варианте платформы для сравнительного анализа постановки стоп

### Аннотация

Компьютерная стабилотрия на четырехопорном варианте стабилотриформы позволяет применять «свободную» постановку ног, что принципиально важно для больных и испытуемых различного возраста. Конструкция стабилотриформы имеет большое значение для поиска оптимальной постановки стоп при регуляции прямохождения, лечения и интерпретации результатов, сравнении с другими исследованиями.

### Введение

Метод компьютерной стабилотрии (КСМ) является одним из способов исследования работы мозга и базовым постулатологическим методом. КСМ заключается в оценке функции равновесия стоящего человека и основан на регистрации траектории движения центра давления на плоскость опоры в положении стоя в покое, а также при выполнении самых различных диагностических тестов [1]. В связи с применением аппаратуры различных фирм возможны ошибки методического характера, связанные с полом, возрастом, болезнью, психоэмоциональным состоянием, конструкцией платформ [1]-[5].

Для правильного применения КСМ важна постановка стоп человека на стабилотриформе. Приняты: «европейская» (стопы разведены на угол 30° и расстояние между внутренними поверхностями пяточной области 2 см) и нормированная «американская» (стопы параллельны друг другу на расстоянии,

привязанном к антропометрическим параметрам обследуемого, – расстоянию между передневерхними осями таза) [6]. Существует и «свободная» постановка, которая визуально занимает среднее положение между «европейской» и «американской». Варианты выбора постановки зависят от устоявшихся стереотипов, страны, технических аспектов аппаратуры обследования [6], [7]. Хотя априори понятно, что при «свободной» постановке мышцы, участвующие в поддержании вертикальной позы у здорового и особенно больного человека, находятся в привычном для человека тоне.

Состояние, проблемы и требования к современным стабилотриформам изложены в работах [1], [2], [6], [7]. В большинстве моделей отечественных и зарубежных стабилотриформ используется трехопорная схема, что существенно сокращает количество технических проблем. Однако этой схеме присущи недостатки, связанные с незначительным диапазоном оценки координат центра давления (ЦД), минимальным радиусом