

# Оптимизация усилителя мощности класса E в передатчике системы индуктивной передачи энергии

Е.В. Селютина, К.О. Гуров, Э.А. Миндубаев, А.А. Данилов

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, orplyana@gmail.com

**Аннотация** — Усилитель мощности (УМ) класса E широко используется в системах индуктивной передачи энергии (ИПЭ) для питания различных электронных устройств. Однако при обеспечении требуемых выходных характеристик систем возникают трудности в проектировании УМ, что ведёт к увеличению времени его разработки. Для оптимизации проектирования было выполнено сравнение выходных характеристик систем ИПЭ с УМ класса E и систем ИПЭ с резонансным LC-контуром в передатчике. Сравнение проводилось в ходе численного моделирования систем в программах LTSpice и Matlab. В ходе исследования УМ класса E работал в номинальном режиме как при одном коэффициенте связи катушек индуктивности систем ИПЭ, так и на заданном диапазоне этих коэффициентов. Иначе говоря, проводилась как статическая, так и динамическая регулировка конденсаторов УМ. В результате исследования отмечена сходимость выходных характеристик между системами ИПЭ с динамически регулируемым УМ класса E и системами ИПЭ с резонансным LC-контуром в передатчике. На основе результатов исследования предложены правила проектирования УМ класса E в зависимости от степени связи передающей и принимающей катушек индуктивности системы ИПЭ.

**Ключевые слова** — беспроводная передача энергии, индуктивная связь, усилитель мощности класса E, имплантируемые медицинские приборы.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Системы индуктивной передачи энергии (ИПЭ) широко используются при реализации питания различных электронных устройств [1]. Примерами таких устройств являются портативная цифровая техника и устройства радиочастотной идентификации [2, 3], имплантируемые медицинские приборы [4, 5, 6], движущиеся роботы [7], автономные подводные и беспилотные летательные аппараты [8], а также электромобили [9].

Распространённым вариантом для передатчика системы ИПЭ является базовая схема УМ класса E [10, 11]. В отличие от линейных УМ, в УМ класса E отмечаются малые потери при переключении транзисторного ключа [12]. Такой УМ имеет небольшие размеры и малый вес, что способствует дальнейшей миниатюризации систем ИПЭ [13].

Стоит отметить, что системы ИПЭ должны поддерживать высокую эффективность и стабильность

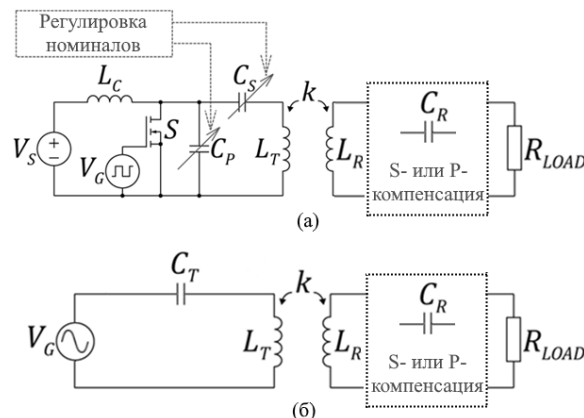
передачи энергии на широком диапазоне смещений катушек индуктивности. В результате этого возникают трудности в проектировании УМ класса E. Как следствие, время разработки систем ИПЭ с заданным УМ увеличивается. Одним из вариантов решения этой проблемы является упрощение теоретического анализа схемы УМ класса E за счёт использования LC-контура.

Таким образом, целью данной работы является уменьшение времени проектирования УМ класса E за счёт использования системы ИПЭ с резонансным LC-контуром в передатчике. В свою очередь, задачи работы заключались в следующем:

- исследование степени схожести выходных характеристик систем ИПЭ с УМ класса E и систем ИПЭ с резонансным LC-контуром;
- разработка правил для уменьшения времени проектирования УМ класса E в составе систем ИПЭ.

## II. РАССМАТРИВАЕМЫЕ СИСТЕМЫ ИНДУКТИВНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ

Принципиальные схемы рассматриваемых систем ИПЭ представлены на рис. 1. В работе исследуются два типа систем.



**Рис. 1. Принципиальные схемы систем ИПЭ, в передатчике которых используется: (а) – УМ класса E; (б) – резонансный LC-контур. В приёмнике используется S- или P-компенсация реактивной мощности**

Первый тип систем ИПЭ представляет собой системы с базовой схемой УМ класса E в передатчике (рис. 1а). Данный УМ включает в себя один транзисторный ключ  $S$  и нагрузочную цепь.

Нагрузочная цепь состоит из шунтирующего  $C_P$  и последовательного  $C_S$  конденсаторов, а также из катушки индуктивности  $L_T$ . Если УМ класса E рассматривается не отдельно, а в составе систем ИПЭ, элемент  $L_T$  используется как передающая катушка. На затвор ключа  $S$  УМ класса E поступает прямоугольный сигнал от импульсного источника  $V_G$ . На сток ключа  $S$  поступает сигнал от источника постоянного питания  $V_S$ . Поскольку  $V_S$  не имеет идеальной выходной сигнал, в качестве фильтра дополнительно используется дроссель  $L_C$ .

Достоинствами используемого УМ класса E является относительно простая реализация и высокая эффективность преобразования входного постоянного сигнала в выходной переменный [14, 15]. В свою очередь, максимальная эффективность может быть достигнута за счёт достижения условия переключения при нулевом напряжении (ПНН). Работа УМ класса E при соблюдении условия ПНН называется номинальным режимом работы. В этом случае отмечается минимизация потерь мощности на ключе  $S$  УМ.

Стоит отметить, что в первом типе систем ИПЭ возможна как статическая, так и динамическая регулировка номиналов конденсаторов  $C_P$  и  $C_S$ . В случае статической регулировки УМ класса E настраивается на номинальный режим только при одном значении коэффициента связи  $k$  передающей  $L_T$  и принимающей  $L_R$  катушек индуктивности систем ИПЭ. При дальнейшем изменении  $k$  новая регулировка не проводится. В случае динамической регулировки УМ работает в номинальном режиме при любом значении коэффициента связи  $k$ .

Второй тип систем ИПЭ представляет собой системы с резонансным LC-контуром в передатчике (рис. 16). LC-контур состоит из передающей катушки индуктивности  $L_T$  и резонансного конденсатора  $C_T$ , подключённого к  $L_T$  последовательно. Используемый LC-контур получает питание от источника синусоидальных сигналов  $V_G$ .

Приёмник в обоих типах систем ИПЭ включает в себя принимающую катушку индуктивности  $L_R$ , нагрузку  $R_{LOAD}$ , а также конденсатор  $C_R$  для компенсации реактивной мощности. Уменьшение реактивной мощности приводит к увеличению эффективности передачи энергии. Компенсирующий конденсатор  $C_R$  может быть подключён к принимающей катушке  $L_R$  как последовательно, так и параллельно. Таким образом, в главе III подробно рассматриваются системы ИПЭ с последовательной (S-) компенсацией в приёмнике. В передатчике используется УМ класса E или резонансный LC-контур. В главе IV исследуются системы ИПЭ с УМ класса E или LC-контуром в передатчике и параллельной (P-) компенсацией в приёмнике.

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ИНДУКТИВНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ В ПРИЁМНИКЕ

Было проведено численное моделирование систем ИПЭ в программах LTSpice и Matlab. В передатчике систем использовался как УМ класса E, так и резонансный LC-контур. В приёмнике использовалась S-компенсация реактивной мощности.

Геометрические параметры передающей и принимающей катушек индуктивности  $L_T$  и  $L_R$  использовались как в системах ИПЭ с УМ класса E, так и в системах ИПЭ с LC-контуром. В работе была исследована пара катушек индуктивности с одинаковыми геометрическими параметрами: внешний и внутренний радиус 24,4 и 4,6 мм соответственно, 10 витков, расстояние от центра до центра соседних витков 2,2 мм, радиус поперечного сечения обмотки 0,4 мм. Эти значения соответствуют требованиям для проектирования систем индуктивного питания имплантируемых медицинских приборов.

Электрические параметры систем ИПЭ с S-компенсацией реактивной мощности в приёмнике представлены в табл. 1. Собственная индуктивность, а также эквивалентное сопротивление катушек индуктивности  $L_T$  и  $L_R$  рассчитаны в программе COMSOL Multiphysics с учётом указанных геометрических параметров.

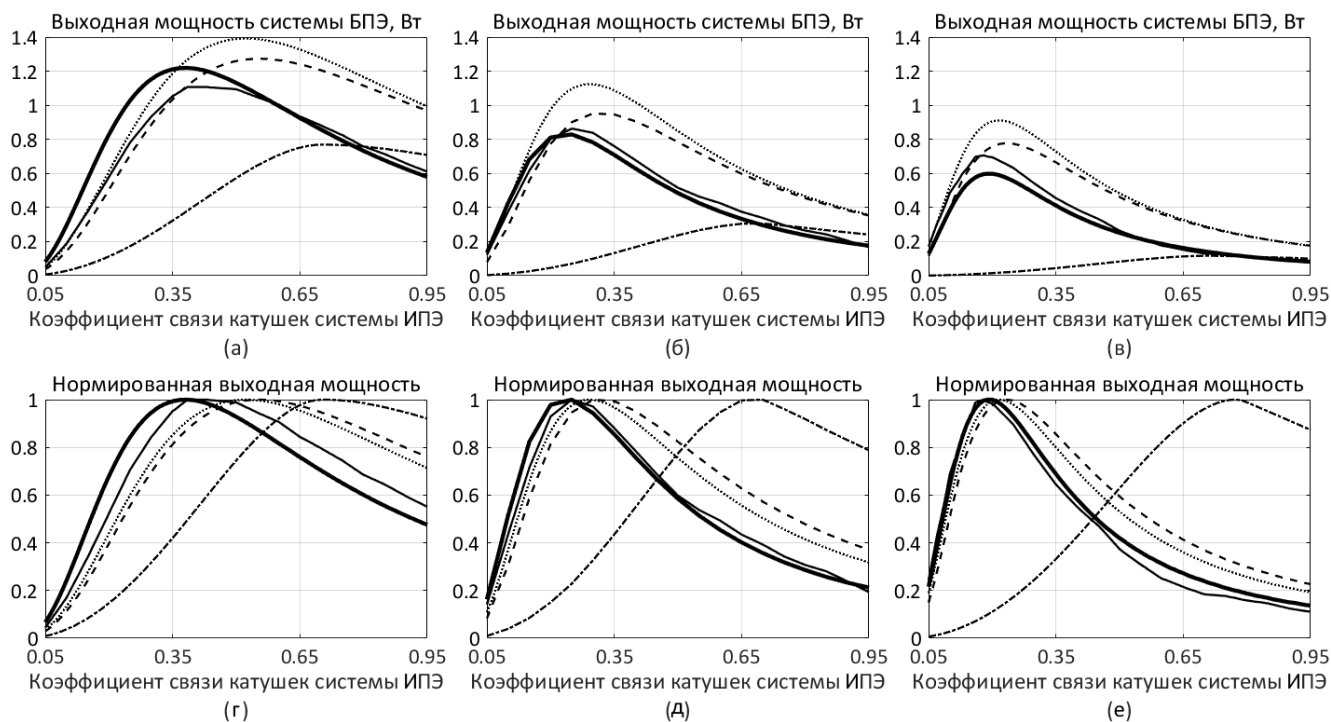
Таблица 1

*Электрические параметры систем ИПЭ. В передатчике систем используется УМ класса E или резонансный LC-контур. В приёмнике используется S-компенсация реактивной мощности*

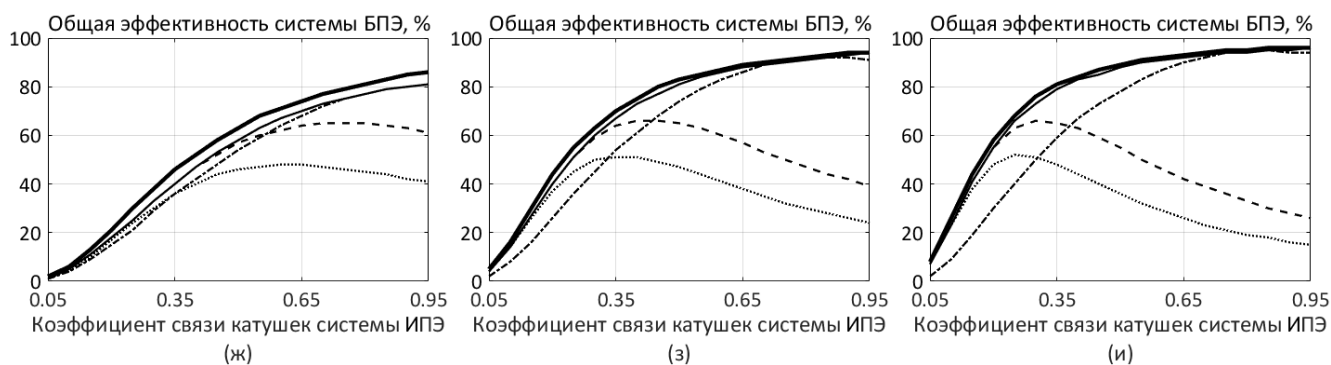
Параметр систем ИПЭ	Значение		
Источник синусоидальных сигналов $V_G$ (LC-контур в передатчике), В	1		
Источник питания $V_S$ (УМ класса E в передатчике), В	1		
Индуктивность дросселя $L_C$ , мкГн	1000		
Сопротивление нагрузки $R_{LOAD}$ , Ом	75		
Рабочая частота $f$ , МГц	0,5	1,0	1,5
Ёмкости конденсаторов $C_T$ и $C_R$ , нФ	43,7	11,0	4,9
Индуктивности катушек $L_T$ и $L_R$ , мкГн	2,32	2,31	2,31
Эквивалентные сопротивления катушек $R_{LT}$ и $R_{LR}$ , Ом	0,102	0,144	0,180

Результаты расчётов выходной мощности систем ИПЭ представлены на рис. 2(а, б, в). Расчёты проводились при рабочих частотах 0,5, 1 и 1,5 МГц соответственно. Коэффициент связи катушек индуктивности изменялся в диапазоне 0,05...0,95. Из рис. 2 возможно отметить сходство характера

зависимостей систем ИПЭ с динамически регулируемым УМ класса Е (сплошная тонкая линия) и систем ИПЭ с LC-контуром (сплошная утолщённая линия). Более явное сходство наблюдается в случае нормировки выходной мощности относительно локального максимума мощности, который отмечается



**Рис. 2. Верхний ряд (а, б, в): зависимость выходной мощности систем ИПЭ от коэффициента связи передающей и принимающей катушек индуктивности. Нижний ряд (г, д, е): выходная мощность нормирована относительно локального максимума, наблюдаемого на диапазоне коэффициентов связи 0,05...0,95. В приёмнике рассмотренных систем ИПЭ используется S-компенсация реактивной мощности**



**Рис. 3. Зависимость общей эффективности систем ИПЭ от коэффициента связи передающей и принимающей катушек индуктивности (ж, з, и). В приёмнике рассмотренных систем ИПЭ используется S-компенсация реактивной мощности**

Сплошная тонкая линия (—) соответствует результатам для систем ИПЭ с динамически регулируемым УМ класса Е. Сплошная утолщённая линия (—) соответствует результатам для систем ИПЭ с резонансным LC-контуром в передатчике. Штриховая линия (---) соответствует результатам для систем ИПЭ со статически регулируемым УМ класса Е. Здесь регулировка УМ проводилась только на коэффициент связи, при котором в случае динамически регулируемого УМ класса Е отмечается локальный максимум выходной мощности. Штрихпунктирная линия (-·-) соответствует результатам для систем ИПЭ со статически регулируемым УМ класса Е. Здесь регулировка УМ проводилась только на коэффициент связи 0,8. Пунктирная линия (···) соответствует результатам для систем ИПЭ со статически регулируемым УМ класса Е. Здесь регулировка УМ проводилась только на коэффициент связи 0,05.

Рабочие частоты систем ИПЭ: в случаях (а, г, ж) – 0,5 МГц; в случаях (б, д, з) – 1,0 МГц; в случаях (в, е, и) – 1,5 МГц.

Коэффициенты критической связи ( $k_{CRIT\_S}$ ): в случаях (а, г, ж) – 0,38; в случаях (б, д, з) – 0,23; в случаях (в, е, и) – 0,17.

в случае систем ИПЭ с динамически регулируемым УМ класса Е. Результаты нормировки выходной мощности систем ИПЭ показаны на рис. 2(г, д, е). Стоит отметить, что степень сходства зависимостей становится больше при увеличении рабочей частоты систем ИПЭ. Однако при дальнейшем увеличении частоты затрудняется подбор номиналов конденсаторов  $C_S$  и  $C_P$  в нагрузочной цепи УМ класса Е.

Таким образом, для быстрой оценки выходной мощности систем ИПЭ с динамически регулируемым УМ класса Е возможно использовать математические уравнения для расчёта характеристик систем ИПЭ с LC-контуром. Это обеспечивает приблизительную оценку коэффициента связи катушек, при котором отмечается локальный максимум выходной мощности. Он соответствует коэффициенту критической связи  $k_{CRIT}$  и рассчитывается с использованием выражения (1):

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

где  $Q_T$  и  $Q_R$  – добротности передатчика и приёмника систем ИПЭ соответственно.

Для системы ИПЭ с резонансным LC-контуром в передатчике и S-компенсацией в приёмнике формула расчёта коэффициента критической связи  $k_{CRIT\_S}$  принимает вид (2):

$$k_{crit\_S} = \sqrt{R_{LT} (R_{LOAD} + R_{LR})} \sqrt{\frac{C_T C_R}{L_T L_R}}, \quad (2)$$

где  $R_{LT}$  и  $R_{LR}$  – соответствующие эквивалентные сопротивления передающей  $L_T$  и принимающей  $L_R$  катушек индуктивности,  $R_{LOAD}$  – сопротивление нагрузки,  $C_T$  и  $C_R$  – конденсаторы в передатчике и приёмнике систем ИПЭ соответственно.

С помощью (2) были рассчитаны следующие значения  $k_{CRIT\_S}$ : 0,38 для рабочей частоты 0,5 МГц, 0,23 для 1 МГц и 0,17 для 1,5 МГц. Из рис. 2 видно, что рассчитанные значения  $k_{CRIT\_S}$  для системы ИПЭ с LC-контуром в передатчике близки к коэффициентам связи, при которых в результате численного моделирования отмечается максимальная выходная мощность систем ИПЭ с динамически регулируемым УМ класса Е. Стоит отметить, что при высокой рабочей частоте наблюдается большая относительная ошибка моделирования. В этом случае рекомендуется проводить моделирование с меньшим шагом изменения коэффициента связи, например, с шагом 0,01.

Результаты расчёта общей эффективности систем ИПЭ приведены на рис. 3 для каждого из значений рабочей частоты системы 0,5, 1 и 1,5 МГц. Как и в случае выходной мощности, существует сходство между системами ИПЭ с динамически регулируемым УМ класса Е и системами ИПЭ с резонансным LC-контуром в передатчике.

#### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ ИНДУКТИВНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ В ПРИЁМНИКЕ

Системы ИПЭ с УМ класса Е и системы ИПЭ с резонансным LC-контуром в передатчике были численно промоделированы в программах LTSpice и Matlab. В приёмнике обоих типов систем использовалась R-компенсацией реактивной мощности. Для катушек индуктивности  $L_T$  и  $L_R$  были использованы геометрические параметры, указанные в главе III. Электрические параметры систем рассматриваемых ИПЭ представлены в таблице 2.

Таблица 2

*Электрические параметры систем ИПЭ. В передатчике систем используется УМ класса Е или резонансный LC-контур. В приёмнике используется R-компенсация реактивной мощности*

Параметр систем ИПЭ	Значение		
Источник синусоидальных сигналов $V_G$ (LC-контур в передатчике), В	1		
Источник питания $V_S$ (УМ класса Е в передатчике), В	1		
Индуктивность дросселя $L_C$ , мкГн	1000		
Сопротивление нагрузки $R_{LOAD}$ , Ом	1000		
Рабочая частота $f$ , МГц	0,4	0,7	1,0
Ёмкости конденсаторов $C_T$ и $C_R$ , нФ	67,9	22,3	11,0
Индуктивности катушек $L_T$ и $L_R$ , мкГн	2,32	2,32	2,31
Эквивалентные сопротивления катушек $R_{LT}$ и $R_{LR}$ , Ом	0,092	0,121	0,144

Для каждой из рабочих частот 0,4, 0,7 и 1 МГц была получена зависимость выходной мощности систем ИПЭ от коэффициента связи передающей и принимающей катушек индуктивности. Результаты представлены на рис. 4, в случаях (а)–(в). Дополнительно при каждом значении рабочей частоты выходная мощность системы ИПЭ была нормирована относительно локального максимума мощности, который отмечался на диапазоне коэффициентов связи 0,01...0,01. Результаты показаны на рис. 4, в случаях (г)–(е).

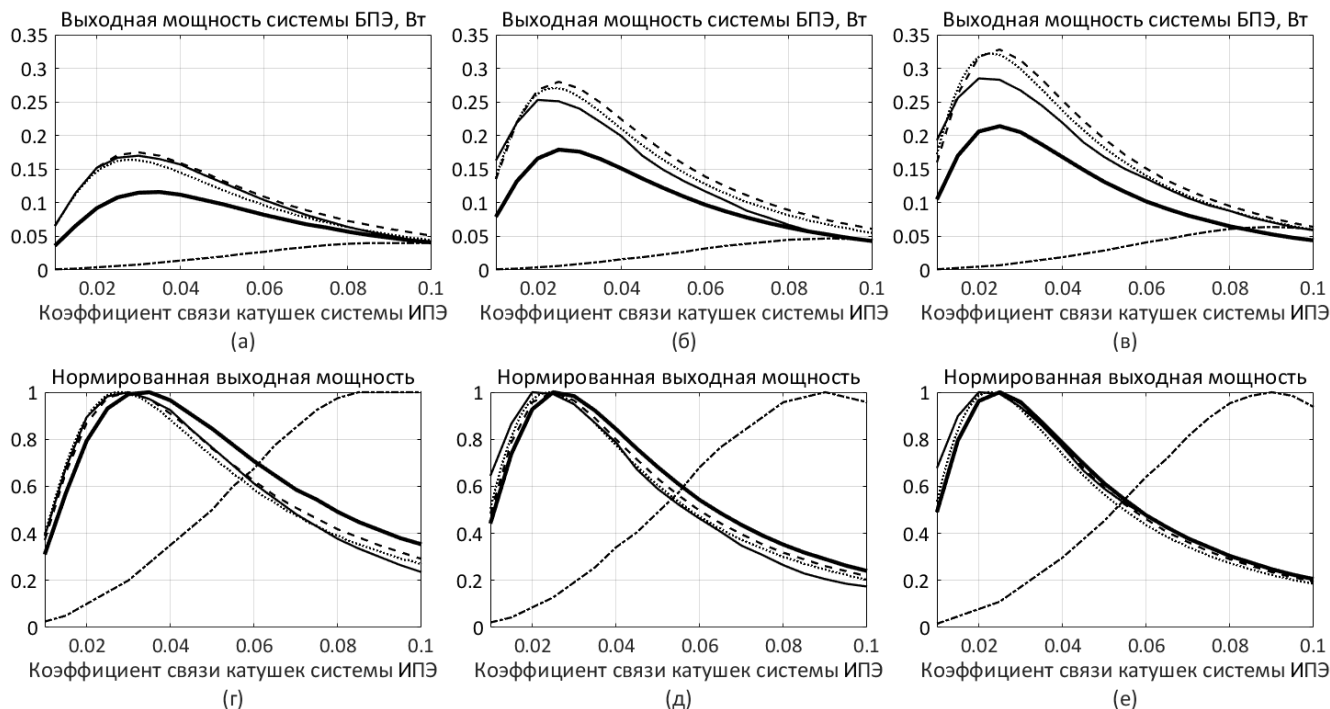
Таким образом, быстрая оценка выходных характеристик систем ИПЭ с динамически регулируемым УМ класса Е при использовании формул для систем с LC-контуром в передатчике возможна как в случае S-, так и в случае R-компенсации реактивной мощности в приёмнике. При использовании формулы (1) выражение для расчёта коэффициента критической связи  $k_{CRIT\_P}$  в случае системы ИПЭ с LC-контуром в передатчике и R-

компенсацией в приёмнике может быть записано в следующем виде:

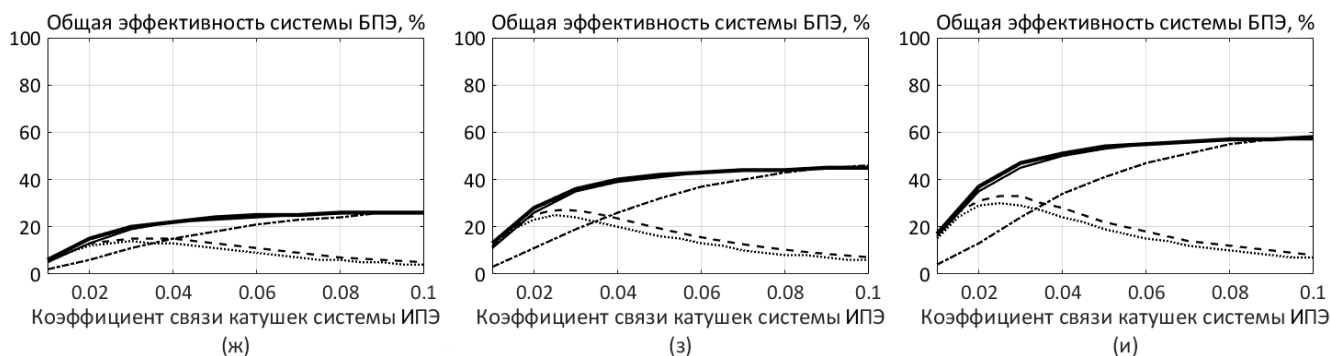
$$k_{crit\_P} = \sqrt{\frac{R_{L_T}}{R_{LOAD} + R_{L_r}} \sqrt{\frac{L_R C_T}{L_T C_R}}} \quad (3)$$

В результате расчётов по формуле (3) параметр  $k_{CRIT\_P}$  при рабочих частотах 0,4 МГц, 0,7 МГц и 1 МГц

составил приблизительно 0,01. Результаты расчётов общей эффективности систем ИПЭ с Р-компенсацией в приёмнике показаны на рис. 5. Как и при S-компенсации, при Р-компенсации в приёмнике общая эффективность систем ИПЭ с УМ класса Е никогда не превышает значения общей эффективности систем ИПЭ с LC-контуром в передатчике.



**Рис. 4. Верхний ряд (а, б, в): зависимость выходной мощности систем ИПЭ от коэффициента связи передающей и принимающей катушек индуктивности. Нижний ряд (г, д, е): выходная мощность нормирована относительно локального максимума, наблюдаемого на диапазоне коэффициентов связи 0,01...0,10. В приёмнике рассмотренных систем ИПЭ используется Р-компенсация реактивной мощности**



**Рис. 5. Зависимость общей эффективности систем ИПЭ от коэффициента связи передающей и принимающей катушек индуктивности (ж, з, и). В приёмнике рассмотренных систем ИПЭ используется Р-компенсация реактивной мощности**

Сплошная тонкая линия (—) соответствует результатам для систем ИПЭ с динамически регулируемым УМ класса Е.  
 Сплошная утолщённая линия (—) соответствует результатам для систем ИПЭ с резонансным LC-контуром в передатчике.  
 Штриховая линия (---) соответствует результатам для систем ИПЭ со статически регулируемым УМ класса Е. Здесь регулировка УМ проводилась только на коэффициент связи, при котором в случае динамически регулируемого УМ класса Е отмечается локальный максимум выходной мощности.  
 Штрихпунктирная линия (-·-) соответствует результатам для систем ИПЭ со статически регулируемым УМ класса Е. Здесь регулировка УМ проводилась только на коэффициент связи 0,09.  
 Пунктирная линия (···) соответствует результатам для систем ИПЭ со статически регулируемым УМ класса Е. Здесь регулировка УМ проводилась только на коэффициент связи 0,005.

Рабочие частоты систем ИПЭ: в случаях (а, г, ж) – 0,4 МГц; в случаях (б, д, з) – 0,7 МГц; в случаях (в, е, и) – 1,0 МГц.  
 Коэффициенты критической связи ( $k_{CRIT\_S}$ ): в случаях (а, г, ж) – 0,01; в случаях (б, д, з) – 0,01; в случаях (в, е, и) – 0,01.

## V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были исследованы системы индуктивной передачи энергии (ИПЭ) с усилителем мощности (УМ) класса E или LC-контуром в передатчике и с последовательной или параллельной компенсацией реактивной мощности в приёмнике. В ходе исследования было отмечено сходство выходных характеристик между системами ИПЭ с динамически регулируемым УМ класса E и системами ИПЭ с LC-контуром в передатчике. Благодаря этому сходству с помощью численного моделирования систем ИПЭ с резонансным LC-контуром возможно определить область коэффициента связи, при которой в системе ИПЭ с динамически регулируемым УМ класса E наблюдается локальный максимум выходной мощности. В то же время численное моделирование систем ИПЭ с LC-контуром происходит значительно быстрее, чем моделирование систем ИПЭ с динамически регулируемым УМ класса E. Время моделирования возможно уменьшить до 300 раз в зависимости от выбранной точности измерений.

Было выявлено, что с помощью численного моделирования системы ИПЭ с резонансным LC-контуром в передатчике возможно определить область выходной мощности системы ИПЭ с динамически регулируемым УМ класса E. Разница между значениями выходной мощности систем ИПЭ с УМ класса E и систем ИПЭ с LC-контуром может зависеть от задержки при переключении транзисторного ключа, напряжения генератора сигналов, а также внутреннего сопротивления и ёмкости транзисторного ключа.

Значение общей эффективности системы ИПЭ с LC-контуром в передатчике является максимально возможным для систем ИПЭ с УМ класса E как при статической, так и при динамической регулировке.

В результате исследования были сформулированы следующие правила для уменьшения времени проектирования систем ИПЭ с УМ класса E в передатчике:

1) Если система ИПЭ с УМ класса E работает при докритической (слабой) связи передающей и принимающей катушек индуктивности, регулировка конденсаторов  $C_S$  и  $C_P$  УМ класса E возможна в диапазоне  $0 \dots k_{CRIT}$ , где  $k_{CRIT}$  – коэффициент критической связи катушек.

2) Если система ИПЭ с УМ класса E работает при субкритической связи передающей и принимающей катушек индуктивности, то следует использовать динамическую регулировку УМ. Субкритическая связь описывается с помощью неравенства  $k_{MIN} < k_{CRIT} < k_{MAX}$ , где  $k_{MIN}$  и  $k_{MAX}$  – соответственно максимальный и минимальный коэффициент связи на требуемом диапазоне смещений передающей и принимающей катушек индуктивности заданной системы ИПЭ.

3) Если система ИПЭ с УМ класса E работает при сверхкритической (сильной) связи передающей и принимающей катушек индуктивности, то УМ класса E возможно настроить на номинальный режим работы

при  $k = (k_{MIN} + k_{MAX}) / 2$ . В этом случае достаточно использовать только статическую регулировку УМ.

## ПОДДЕРЖКА

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

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Stoecklin S., Yousaf A., Gidion G., Reindl L., Rupitsch S.J. Simultaneous power feedback and maximum efficiency point tracking for miniaturized rf wireless power transfer systems // *Sensors*. 2021. V. 21. №. 6. P. 2023-1–2023-28.
- [2] Zhu J.-Q., Ban Y.-L., Xu R.-M., Mi C.C. An NFC-connected coupler using IPT-CPT-combined wireless charging for metal-cover smartphone applications // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2020. V. 36. №. 6. P. 6323–6338.
- [3] Rodriguez D., Saed M.A., Li C. A WPT/NFC-based sensing approach for beverage freshness detection using supervised machine learning // *IEEE Sensors Journal*. 2020. T. 21. №. 1. P. 733–742.
- [4] Haerinia M., Shadid R., Noghianian S. Wireless power transfer for implantable and wearable medical devices // *Wideband, Multiband, and Smart Antenna Systems / Springer, Cham*, 2021. P. 395–426.
- [5] Pokharel R.K., Barakat A., Alshhawy S., Yoshitomi K., Sarris C. Wireless power transfer system rigid to tissue characteristics using metamaterial inspired geometry for biomedical implant applications // *Scientific reports*. 2021. V. 11. №. 1. P. 1–10.
- [6] Hernández Sebastián N., Villa Villaseñor N., Renero-Carrillo F.-J., Díaz Alonso D., Calleja Arriaga W. Design of a fully integrated inductive coupling system: a discrete approach towards sensing ventricular pressure // *Sensors*. 2020. V. 20. №. 5. P. 1525-1–1525-20.
- [7] Corti F., Reatti A., Wu Y.H., Czarkowski D., Musumeci S. Zero voltage switching condition in class-e inverter for capacitive wireless power transfer applications // *Energies*. 2021. V. 14. №. 4. P. 911-1–911-21.
- [8] Rong C., He X., Wu Y., Qi Y., Wang R., Sun Y., Liu M. Optimization design of resonance coils with high misalignment tolerance for drone wireless charging based on genetic algorithm // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021. V. 58. №. 1. P. 1242–1253.
- [9] Li P., Long Z., Yang Z. RF energy harvesting for batteryless and maintenance-free condition monitoring of railway tracks // *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. V. 8. №. 5. P. 3512–3523.
- [10] Sokal N.O., Sokal A.D. Class EA new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers // *IEEE Journal of solid-state circuits*. 1975. T. 10. №. 3. P. 168–176.
- [11] Sokal N.O. Class-E RF power amplifiers // *Qex*. 2001. T. 204. №. 1. P. 9–20.
- [12] Casallas I., Urbina R., Paez-Rueda C.I., Perilla G., Pérez M., Fajardo A. Analysis of the soft-switching tuning effect on the figures of merit involved in the design of a class-E amplifier with finite DC-feed inductance // *Electronics*. – 2021. V. 10. №. 14. P. 1705-1–1705-24.
- [13] Oh H., Lee W., Koo H., Bae J., Hwang K.C., Lee K.-Y., Yang Y. 6.78 MHz wireless power transmitter based on a reconfigurable Class-E power amplifier for multiple device charging // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019. V. 35. №. 6. P. 5907–5917.

[14] Selyutina E.V., Gurov K.O., Mindubaev E.A., Danilov A.A. The effect of load resistance and coupling coefficient on the operational stability of a transcutaneous inductive power transfer system with capacitive tuning // *Biomedical Engineering*. 2021. V. 55. №. 3. P. 180–183.

[15] Grebennikov A. Switched-mode RF and microwave parallel-circuit Class E power amplifiers // *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2004. V. 14. №. 1. P. 21–35.

## Optimization of a Class E Power Amplifier in the Transmitting Part of an Inductive Power Transfer System

E.V. Selyutina, K.O. Gurov, E.A. Mindubaev, A.A. Danilov

National Research University of Electronic Technology, Moscow, oplyana@gmail.com

**Abstract** — A class E power amplifier (PA) is widely used for designing the inductive power transfer (IPT) systems to supply various electronic devices. However, it is difficult to design the class E PA to obtain the required IPT system output characteristics. Design difficulties lead to increase of development time. To optimize the class E PA design, output characteristics of IPT systems with a class E PA and IPT systems with a resonance LC-circuit have been compared. During the investigation, IPT systems have been modeled numerically in the LTSpice and Matlab software. Capacitors in the class E PA load network have been tuned statically or dynamically. In the case of static tuning, a class E PA operated in the nominal conditions for the one coupling coefficient value of IPT system inductive coils. In the case of dynamic tuning, a class E PA operated in the nominal conditions for the range of coupling coefficient values. As a result, similarity has been noted between output characteristics of IPT systems with dynamically tuned class E PA and output characteristics of IPT systems with a resonant LC-circuit in the transmitter. Using the investigation results, rules of class E PA design have been proposed. According to these rules, class E PA design depends on the coupling of IPT system inductive coils.

**Keywords** — implantable medical devices, wireless power transfer, inductive coupling, class E power amplifier.

### REFERENCES

[1] Stoecklin S., Yousaf A., Gidion G., Reindl L., Rupitsch S.J. Simultaneous power feedback and maximum efficiency point tracking for miniaturized rf wireless power transfer systems // *Sensors*. 2021. V. 21. №. 6. P. 2023-1–2023-28.

[2] Zhu J.-Q., Ban Y.-L., Xu R.-M., Mi C.C. An NFC-connected coupler using IPT-CPT-combined wireless charging for metal-cover smartphone applications // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2020. V. 36. №. 6. P. 6323–6338.

[3] Rodriguez D., Saed M.A., Li C. A WPT/NFC-based sensing approach for beverage freshness detection using supervised machine learning // *IEEE Sensors Journal*. 2020. T. 21. №. 1. P. 733–742.

[4] Haerinia M., Shadid R., Noghmanian S. Wireless power transfer for implantable and wearable medical devices // *Wideband, Multiband, and Smart Antenna Systems* / Springer, Cham, 2021. P. 395–426.

[5] Pokharel R.K., Barakat A., Alshhawy S., Yoshitomi K., Sarris C. Wireless power transfer system rigid to tissue characteristics using metamaterial inspired geometry for biomedical implant applications // *Scientific reports*. 2021. V. 11. №. 1. P. 1–10.

[6] Hernández Sebastián N., Villa Villaseñor N., Renero-Carrillo F.-J., Díaz Alonso D., Calleja Arriaga W. Design of a fully integrated inductive coupling system: a discrete approach towards sensing ventricular pressure // *Sensors*. 2020. V. 20. №. 5. P. 1525-1–1525-20.

[7] Corti F., Reatti A., Wu Y.H., Czarkowski D., Musumeci S. Zero voltage switching condition in class-e inverter for capacitive wireless power transfer applications // *Energies*. 2021. V. 14. №. 4. P. 911-1–911-21.

[8] Rong C., He X., Wu Y., Qi Y., Wang R., Sun Y., Liu M. Optimization design of resonance coils with high misalignment tolerance for drone wireless charging based on genetic algorithm // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2021. V. 58. №. 1. P. 1242–1253.

[9] Li P., Long Z., Yang Z. RF energy harvesting for batteryless and maintenance-free condition monitoring of railway tracks // *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. V. 8. №. 5. P. 3512–3523.

[10] Sokal N.O., Sokal A.D. Class EA new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers // *IEEE Journal of solid-state circuits*. 1975. T. 10. №. 3. P. 168–176.

[11] Sokal N.O. Class-E RF power amplifiers // *Qex*. 2001. T. 204. №. 1. P. 9–20.

[12] Casallas I., Urbina R., Paez-Rueda C.I., Perilla G., Pérez M., Fajardo A. Analysis of the soft-switching tuning effect on the figures of merit involved in the design of a class-E amplifier with finite DC-feed inductance // *Electronics*. – 2021. V. 10. №. 14. P. 1705-1–1705-24.

[13] Oh H., Lee W., Koo H., Bae J., Hwang K.C., Lee K.-Y., Yang Y. 6.78 MHz wireless power transmitter based on a reconfigurable Class-E power amplifier for multiple device charging // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2019. V. 35. №. 6. P. 5907–5917.

[14] Selyutina E.V., Gurov K.O., Mindubaev E.A., Danilov A.A. The effect of load resistance and coupling coefficient on the operational stability of a transcutaneous inductive power transfer system with capacitive tuning // *Biomedical Engineering*. 2021. V. 55. №. 3. P. 180–183.

[15] Grebennikov A. Switched-mode RF and microwave parallel-circuit Class E power amplifiers // *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*. 2004. V. 14. №. 1. P. 21–35.