International Scientific Conference 20 UNITECH 26

INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE
19-21 November 2026
GABROVO

КОНСТРУКТИВНИ И СХЕМОТЕХНИЧНИ МЕРКИ ЗА УВЕЛИЧАВАНЕ НА РАЗСТОЯНИЕТО ПРИ ИНДУКТИВНИТЕ БЕЗКОНТАКТНИ ПРЕДАВАТЕЛИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

Десислав Илиев[1], Николай Маджаров[2]

[1]Технически университет Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ №4, Габрово, България
[2]Технически университет Габрово, ул. „Хаджи Димитър“ №4, Габрово, България
**кореспондиращ автор: d.iliev@tugab.bg*

Център за компетентност „Интелигентни, мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“

MECHANICAL AND CIRCUIT DESIGN TECHNIQUES FOR INCREASING THE TRANSMISSION DISTANCE IN INDUCTIVE WIRELESS POWER TRANSFER SISTEM

Desislav Iliev[1], Nikolay Madzharov[2]

[1] Technical University of Gabrovo, H. Dimitar Str. 4, Gabrovo, Bulgaria
[2] Technical University of Gabrovo, H. Dimitar Str. 4, Gabrovo, Bulgaria
**Corresponding author: d.iliev@tugab.bg*

Center of competence "Smart mechatronic, eco- and energy-saving systems and technologies"

Abstract
This article presents the main design variants for inductive wireless power transfer systems. An analysis is conducted on the primary configurations, the coil types for both the transmitter and receiver, the core structures and types of magnetic cores utilized in their construction, as well as the essential compensation topologies.

Keywords: IWPT, efficiency, mutual inductance

ВЪВЕДЕНИЕ

През последните 20 години безконтактните предаватели на електрическа енергия (БПЕЕ) намират все по-широко разпространение в практиката и в ежедневния живот на хората. От всички основни методи за безконтактен пренос на енергия [1-6] (микровълнови ,оптични, капацитивни и индуктивни) най-голямо разпространение и приложение са намерили индуктивните БПЕЕ (ИБПЕЕ) [7].

Това се дължи на много фактори. Развитието на микроелектрониката и програмното осигуряване даде възможност управлението на този вид системи да се миниатюризира, както и да се осъществява бърз обмен на данни между отделните модули и системи в ИБПЕЕ. Развитието на силовите ключови елементи (GaN и SiC транзистори) даде възможност да се комутират големи по стойност напрежения и токове, което доведе до увеличаване на пренасяната по индуктивен път мощност. Друга съществена страна на този вид БПЕЕ е, че при правилни конструктивни мерки при изграждането им те оказват най-малко влияние върху живите организми.

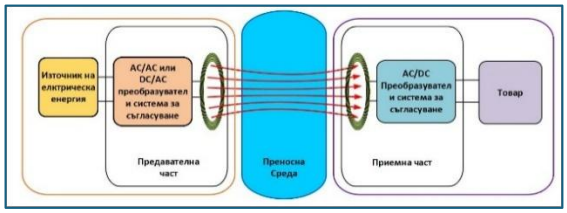
Print ISSN: 1313-230X, Online ISSN: 3033-1404

Едно от най-важните ограничения за увеличаване на приложенията на ИБПЕЕ в практиката се оказва малкото разстояние на предаване на енергията, при което се запазва относително добра ефективност на ИБПЕЕ.

В тази статия се разглеждат основните конструкции и методи за съгласуване на ИБПЕЕ и е направен обобщен анализа на техните характеристики.

КОНСТРУКЦИИ И МЕТОДИ ЗА СЪГЛАСУВАНЕ НА ИБПЕЕ. АНАЛИЗ И ХАРАКТЕРИСТИКИ.

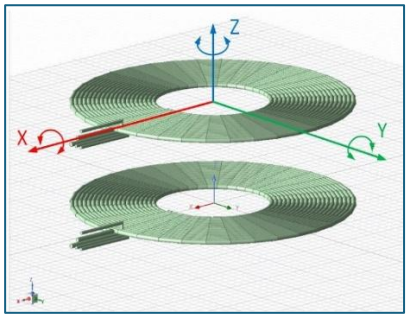
ИБПЕЕ използват магнитно поле за пренос на енергия, като предавателя представлява бобина с определена форма, размер и брой навивки, и определена индуктивност. В по-вече случаи приемника представлява същата бобина по размери и форма, и същата индуктивност (Фиг.1). Това е основният вид ИБПЕЕ, при която съществува едно основно ограничение- при увеличаване на разстоянието, на което се прехвърля енергия на по-вече от ¼ от диаметъра на предавателната и приемната намотка (D), ефективността на системата рязко спада под 80%.



***Фиг. 1**. Принципна схема на ИБПЕЕ.*

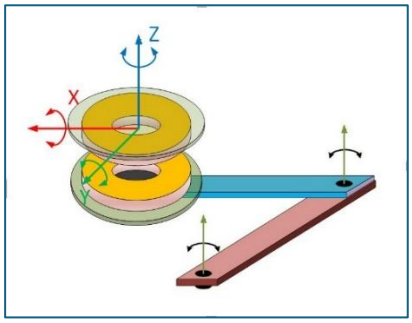
1. Основни механични варианти на предавателната и приемната част на ИБПЕЕ. Степени на свобода.

Ако се приеме, че предавателната част на ИБПЕЕ е неподвижна, а приемната част е подвижна, то тогава от механична гледна точка системата ще има шест степени на свобода (Фиг. 2). Това са преместване по трите оси (X, Y и Z) и ротация по трите оси (X, Y и Z). В по-голяма част от случаите при проектиране на този вид системи предавателната и приемната бобина са оформени като планарни намотки (Фиг. 2).



***Фиг. 2**. Степени на свобода на приемната част спрямо неподвижната предавателна част на ИБПЕЕ.*

Има няколко конструктивни варианта за изграждане на предавателната и приемната част на ИБПЕЕ. Вариант 1- подвижна приемна и неподвижна предавателна част. Вариант 2- подвижна приемна част и подвижна или частично движеща се предавателна част. Вариант 3- подвижна приемна част и неподвижна предавателна част, като предавателната част е значително по-дълга от приемната част. Вариант 4 -подвижна приемна част и неподвижна предавателна част, която е съставена от отделни предавателни намотки. Само Вариант 3 може да покрие всичките степени (Фиг. 3).



***Фиг. 3**. ИБПЕЕ, чиято предавателна намотка е монтирана върху пантограф, който позволява преместване и ротация по осите X, Y и Z.*

Представените конструктивни варианти могат да удовлетворят всички възможни степени на свобода, но това води до голямо усложняване от конструктивна гледна точка на ИБПЕЕ, което налага търсенето на други решения за увеличаване на степените на свобода на системата.

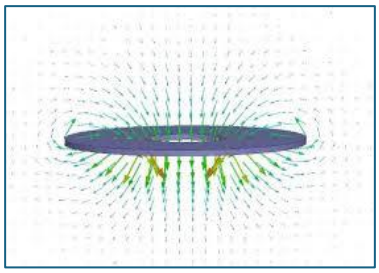
2. Конструктивни мерки за увеличаване на разстоянието на предаване при ИБПЕЕ.

Единият възможен метод за увеличаване на разстоянието на предаване е чрез усъвършенстване на конструкцията на предавателя и приемника на системата. Основните части, от които те се състоят са намотка и магнитопровод. За да се увеличи разстоянието на предаване на ИБПЕЕ (по оста Z), трябва да се увеличи коефициента на магнитна връзка между предавателната и приемната намотка. Това може да стане или чрез подходяща конфигурация на намотките на предавателя и приемника, или чрез подходящо оформяна на магнитопроводите.

2.1 Видовете намотки на предавателя и приемника

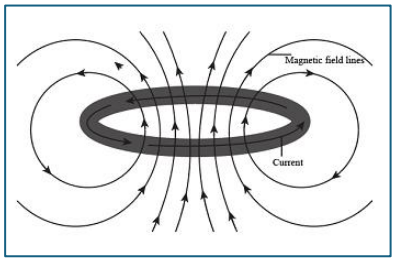
При изграждането на ИБПЕЕ се използват три вида конфигурации на намотките [8].

Планарна (плоска) намотка. Тя представлява навит на спирала проводник, чиито навивки са разположени в една равнина (плоскост). Обикновено този вид намотки се изграждат само с един слой. Диаметърът и обикновено е десетки пъти по-голям от височината и, която основно се определя от диаметъра на проводника, от който е навита. Индуктивността на този вид намотка не е голяма, но за сметка на това разсеяния магнитен поток е голям и магнитното поле, което се създава около нея е сравнително равномерно разпределено в пространството, особено по направлението на оста Z, което дава възможност за по добра магнитна връзка между такива намотки (Фиг. 4). В следствие на малката дължина на проводника, обикновено активното съпротивление не е голямо. Равномерното разпределение по магнитното поле по оста Z (в която се предава енергията) на намотката и малкото активни загуби определя доброто КПД при индуктивния пренос на енергия.



***Фиг. 4**. Разпределение на магнитното поле около планарна намотка.*

Тороидална намотка. Проводника на този вид намотка е навит в много слоеве около пръстеновидна сърцевина. Намотката се получава с форма на тороид, от където е и името и. Обикновено напречното и сечение е с правоъгълна форма, но съществуват и намотки с елиптични и кръгли сечения. Обикновено индуктивността и е голяма, но голяма част от магнитния поток се затваря вътре в намотката. Разсеяният магнитен поток е малък, като магнитното поле е неравномерно разпределено в пространството, особено по оста Z (Фиг. 5). Активното съпротивление на този вид намотки е голямо. Посочените характеристики на този вид намотки определят ниското КПД при индуктивния пренос на енергия.

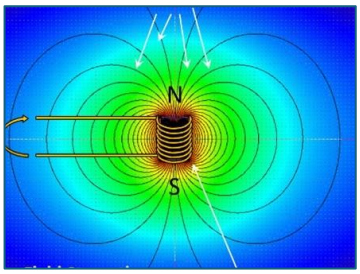


***Фиг. 5**. Магнитно поле на тороидална намотка.*

Цилиндрична намотка. Проводника на този вид намотка е навит в много слоеве около пръстеновидна сърцевина. Намотката се получава с форма на тороид, от където е и името и. Обикновено напречното и сечение е с правоъгълна форма, но съществуват и намотки с елиптични и кръгли сечения. Обикновено индуктивността и е голяма, но голяма част от маг-

нитния поток се затваря вътре в намотката. Разсеяният магнитен поток е малък, като магнитното поле е неравномерно разпределено в пространството, особено по оста Z (Фиг. 6). Активното съпротивление на този вид намотки е голямо.

Посочените характеристики на този вид намотки определят ниското КПД при индуктивния пренос на енергия.

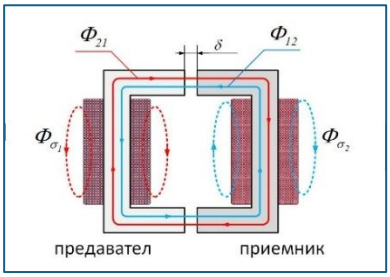


***Фиг. 6**. Магнитно поле на цилиндрична намотка.*

От представените по-горе видове намотки най-подходяща за изграждане на ИБПЕЕ с увеличаване на разстоянието на предаване на енергия е планарната намотка, тъй като магнитното поле е добре разпределено по оста Z.

2.2 Видове магнитопроводи на предавателя и приемника

Предавателя и приемника могат да се разглеждат като трансформатор, при които за разлика от класическия трансформатор магнитопровод е разделен на две части. В едната част на магнитопровода е поместена предавателната намотка, а в другата част е поместена приемната намотка (Фиг. 7). В този случай предавателната и приемната намотка имат отделни магнитни вериги. Това води до увеличаване на разсеяния магнитен поток както от предавателната намотка, така и от приемната намотка. На фигурата са представени: L_R - магнитен поток на разсейване, предизвикан от предавателната намотка, Φ_{σ_2} - магнитен поток на разсейване, предизвикан от приемната намотка, Φ_{21} - магнитен поток създаден от тока, протичащ в предавателната намотка, който се вплита в приемната намотка, Φ_{12} - магнитен поток създаден от тока, протичащ в приемната намотка, който се вплита в предавателната намотка; δ - разстояние между предавателя и приемника на ИБПЕЕ.



***Фиг. 7**. Предавателната и приемната част на ИБПЕЕ, представена като трансформатор с междина (която представлява преносната среда).*

На Фиг. 7 с червени прекъсни линии е представен разсеяния магнитен поток, създаден от предавателната намотка, със сини прекъснати линии е представен разсеяния магнитен поток, създаден от приемната намотка, с червени непрекъснати линии е представен основния магнитен поток, създаден от предавателната намотка и със сини непрекъснати линии основния магнитен поток, създаден от приемната намотка.

Съществуват пет основни вида магнитопроводи, които се използват при ИБПЕЕ [9]. Те биват:

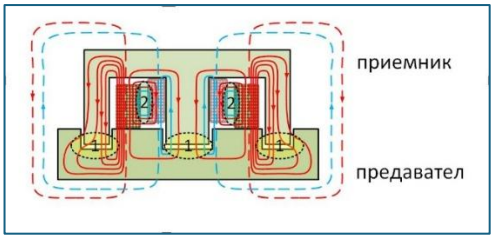
- предавателна и приемна част с Е образен магнитопровод;
- предавателна част с плосък магнитопровод и приемна част с Е образен магнитопровод;
- предавателна част инвертирано Е и приемна част Е;
- предавателна и приемна част, оформени като П образни магнитопроводи;
- предавателна част с плосък магнитопровод и приемна част П образен магнитопровод.

В зависимост от начина на оформянето им е възможно да се увеличи разстоянието на предаване (δ) на ИБПЕЕ.

Най-удачни за изграждане на ИБПЕЕ с увеличаване на разстоянието на предаване (δ) е магнитопровода с предавателна част инвертирано Е и приемна част Е

(Фиг. 8). Означенията са същите, както във Фиг. 7.

При това оформяне на магнитопровода обаче след определено разстояние разсеяния магнитен поток в зони 1 и 2 (Фиг. 8) ще се увеличи до нива, които рязко ще понижат ефективността на системата. Друг недостатък на всички конструкции е, че те не позволяват монтирането на планарни намотки.



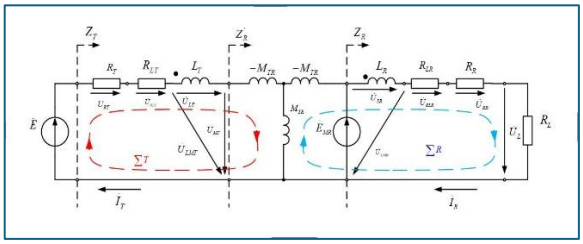
***Фиг. 8**. Разрез на предавателна част инвертирано Е и приемна част Е.*

2.3 Схемотехнични мерки за увеличаване на разстоянието при ИБПЕЕ.

От схемотехнична гледна точка ИБПЕЕ се разделят на две групи- ИБПЕЕ без схеми за компенсация (N-N) и ИБПЕЕ със схеми за компенсация (N-S, S-N, S-S и S-P). Компенсиращия елемент (или елементи) в схемата са допълнително поставени кондензатори, чиято цел е изцяло или частично да компенсират индуктивното съпротивление на предавателната или приемната бобина, а в някой случаи и на двете едновременно. Схемите за компенсация се обозначават с комбинация от латинските букви “N”, “S” и “P”. “N” означава, че няма кондензатор. “S”, че той е поставен последователно на бобината и “P”, че той е поставен паралелно на бобината.

2.3.1 ИБПЕЕ без схеми за компенсация (N-N).

На Фиг. 9 е представена Т-образна заместваща схема на ИБПЕЕ без компенсиращи елементи. Тази схема е удобно да се използва, тъй като електромагнитната връзка (взаимната индуктивност (M_{TR}) между предавателната и приемната бобина) може да се замени с електрическа и в схемата се добавят три бобини. Със символа $\sum_T$ е представена посоката на сумиране за уравненията по втори закон на Кирхоф за предавателната част, а със символа $\sum R$ е представена посоката на сумиране за уравненията по втори закон на Кирхоф за приемната част.



***Фиг. 9**. Т-образна заместваща схема на ИБПЕЕ без компенсиращи елементи.*

На фигурата са представени следните величини: $\dot{E}$ -захранващ източник (източник на електродвижещо напрежение (ЕДН)); $\dot{I}_T$ -ток в предавателната част; R_T - активно съпротивление на предавателната част; R_{LT} -активно съпротивление на предавателната бобина; L_T - индуктивност на предавателната бобина; $\dot{U}_{LMT}$ -напрежение на предавателната бобина; U_{LT} - напрежение на самоиндукция в предавателната бобина; $\dot{U}_{MT}$ - индуцирано напрежение от тока , протичащ през приемната бобина в предавателната бобина; $\dot{U}_{RLT}$ - напрежение върху активното съпротивление на предавателната бобина; Z_T - входен импеданс на ИБПЕЕ (товар за захранващия източник); M_{TR} - взаимна индуктивност между предавателната и приемната бобина; $Z_R^{'}$ - отразен (внесен) импеданс (импеданс на приемната част, който е товарен за предавателната част); $\dot{E}_{MR}$ - индуцирано напрежение от тока, протичащ през предавателната бобина в приемната бобина; $\dot{U}_{LR}$ - напрежение на самоиндукция в приемната бобина; $\dot{U}_{RLR}$ - напрежение върху активното съпротивление на приемната бобина; $\dot{U}_{LMR}$ - напрежение върху приемната бобина; L_R - индуктивност на приемната бобина; $\dot{I}_R$ - ток в приемната част; R_{LR} - активно съпроти-

вление на приемната бобина; R_R - активно съпротивление на приемната част; Z_R - входен импеданс на приемната част; $\dot{U}_L$ - напрежение върху товара и R_L -товар.

В разглежданията от този момент ще се приеме, че товара е идеален и той има само активна съставяща (R) и няма реактивна (X) съставяща на импеданса (Z), докато не бъде допълнително упоменато.

Ефективността на този вид ИБПЕЕ се представя посредством зависимостта:

$$\eta = \frac{P_L}{P_T + P_R + P_L}, \% \qquad (1)$$

Където: P_L -мощност, отделена в товара, P_T -мощност, отделена в предавателния модул и P_R - мощност, отделена в приемния модул.

Като използваме зависимостта за съотношенията на мощностите в отделните части на ИБПЕЕ се получава:

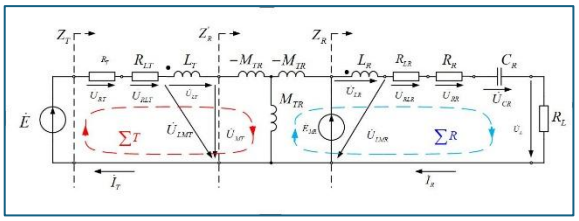
$$P_T : P_R : P_L = \left(\left(R_R + R_{LR} + R_L\right)^2 + \left(\omega L_R\right)^2\right).$$
$$\left(R_T + R_{LT}\right) : \left(\omega M_{TR}\right)^2 .\left(R_R + R_{LR}\right) : \qquad (2)$$
$$\left(\omega M_{TR}\right)^2 .R_L$$

Като използваме зависимостите (1) и (2) за ефективността на системата получаваме зависимостта:

$$\eta = \frac{\left(\omega M_{TR}\right)^2 .R_L}{\left(\left(R_R + R_{LR} + R_L\right)^2 + \left(\omega L_R\right)^2\right).\left(R_T + R_{LT}\right) +} \qquad (3)$$
$$\left(\omega M_{TR}\right)^2 .\left(R_R + R_{LR}\right) + \left(\omega M_{TR}\right)^2 .R_L$$

2.3.2 ИБПЕЕ с един компенсиращ елемент, поставен последователно в приемната част (N-S).

На фиг. 10 е представена Т- образна заместваща схема на този вид ИБПЕЕ. В схемата в приемната част е поставен кондензатор (C_R), който е свързан последователно на приемната бобина (L_R) и товара (R_L).



***Фиг. 10**. Т-образна заместваща схема на ИБПЕЕ с N-S компенсация.*

Ефективността на този вид ИБПЕЕ се дава с израза:

$$\eta = \frac{\left(\omega M_{TR}\right)^2 .R_L}{\left(\left(R_R + R_{LR} + R_L\right)^2 + \left(\omega L_T - \frac{1}{\omega C_T}\right)^2\right).} \qquad (4)$$
$$\left(R_T + R_{LT}\right) + \left(\omega M_{TR}\right)^2 .\left(R_R + R_{LR}\right) + \left(\omega M_{TR}\right)^2 .R_L$$

При работа на системата при резонансна честота:

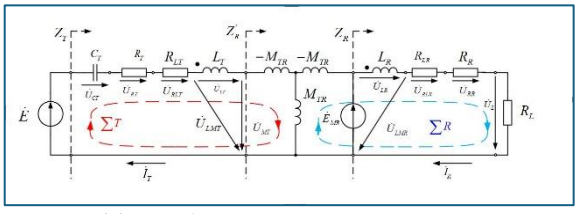
$$\omega_{RES} = \sqrt{\frac{1}{L_R C_R}} \qquad (5)$$

Израза за ефективността на системата ще придобие вида:

$$\eta = \frac{\left(\omega M_{TR}\right)^2 .R_L}{\left(R_R + R_{LR} + R_L\right)^2 \left(R_T + R_{LT}\right) +} \qquad (6)$$
$$\left(\left(\omega M_{TR}\right)^2 \left(R_R + R_{LR}\right)\right) + \left(\omega M_{TR}\right)^2 .R_L$$

2.3.3 ИБПЕЕ с един компенсиращ елемент, поставен последователно в предавателната част (S-N).

На фиг. 11 е представена Т- образна заместваща схема на този вид ИБПЕЕ. В схемата в предавателната част е поставен кондензатор (C_T), който е свързан последователно на източника на напрежение ($\dot{E}$) и предавателната бобина (L_T). В приемната част няма поставен компенсиращ елемент.



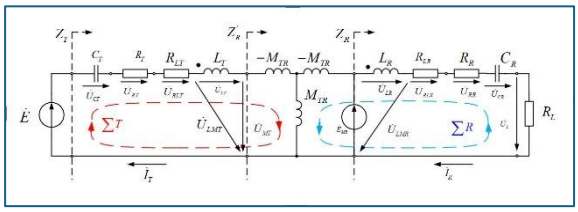
***Фиг. 11**. Т-образна заместваща схема на ИБПЕЕ с S-N компенсация.*

При този вид схема за компенсация зависимостите за ефективността, съотношението на мощностите и максималната ефективност са като при ИБПЕЕ без схеми за компенсация (1), (2) и (3), независимо, че системата работи при условие на резонанс, дадено със зависимостта:

$$\omega_{RES} = \sqrt{\frac{1}{L_T C_T}} \tag{7}$$

3.2.4 ИБПЕЕ с два компенсиращи елемента, поставен последователно в предавателната и приемната част (S-S).

На фиг. 2.12 е представена Т- образна заместваща схема на този вид ИБПЕЕ. Принципната схема на предавателната част е същата, както при S-N компенсация. В приемната част е поставен кондензатор (C_R), който е свързан последователно на консуматора (R_L) и приемната бобина (L_R).



***Фиг. 12**. Т-образна заместваща схема на ИБПЕЕ с S-S компенсация.*

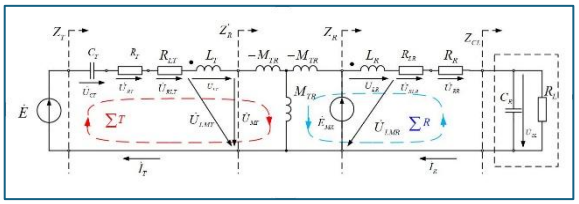
При резонансната честота съотношението на мощностите и ефективността на системата се представя посредством зависимостите:

$$P_T : P_R : P_L = \left(R_R + R_{LR} + R_L\right)^2 \left(R_T + R_{LT}\right) : \left(\omega M_{TR}\right)^2 .\left(R_R + R_{LR}\right) : \left(\omega M_{TR}\right)^2 .R_L \tag{8}$$

$$\eta = \frac{\left(\omega M_{TR}\right)^2 .R_L}{\left(R_R + R_{LR} + R_L\right)^2 \left(R_T + R_{LT}\right) + \left(\omega M_{TR}\right)^2 .\left(R_R + R_{LR}\right) + \left(\omega M_{TR}\right)^2 .R_L} \tag{9}$$

2.3.5 ИБПЕЕ с два компенсиращи елемента, поставени последователно в предавателната част и паралелно в приемната част (S-P).

На фиг. 2.13 е представена Т- образна заместваща схема на този вид ИБПЕЕ. Принципната схема на предавателната част е същата, както при S-S компенсация. В приемната част е поставен кондензатор (C_R), който е свързан паралелно на консуматора (R_L) и приемната бобина (L_R).



***Фиг. 13**. Т-образна заместваща схема на ИБПЕЕ с S-P компенсация.*

В този случай паралелно на товара имаме свързан капацитивен елемент и товара не може да го разглеждаме като идеален, а към активното му съпротивление се добавя и реактивното съпротивление на кондензатора ( ). В Т-заместващата схема от фиг. 12 товара е представен посредством импеданса (Z_{CL}) със зависимостта:

$$Z_{CL} = \frac{R_L . \frac{1}{j\omega C_R}}{R_L + \frac{1}{j\omega C_R}} = \frac{R_L - j\omega C_R R_L^2}{1 + \omega^2 C_R^2 R_L^2} = R_{CL} - jX_{CL} \tag{10}$$

Ако ИБПЕЕ работи в услови е на резонанс ефективността на системата се дава посредством зависимостта:

$$\eta = \frac{\left(\omega M_{TR}\right)^2 .R_{CL}}{\left(R_R + R_{LR} + R_{CL}\right)^2 \left(R_T + R_{LT}\right) + \left(\omega M_{TR}\right)^2 .\left(R_R + R_{LR}\right) + \left(\omega M_{TR}\right)^2 .R_{CL}} \tag{11}$$

2.3.6 Зависимост между разстоянието на предаване и ефективността на ИБПЕЕ.

Ако коефициента на магнитна връзка се поддържа над ниво 0.7, максималната ефективността на системата може да достигне над 90 процента. При спадане на коефициента на магнитна връзка под 0,7 ефективността на системата намалява по експоненциален закон.

Като се използва зависимостта:

$$k(\delta) \approx \frac{D^2}{\left(D^2 + 4\delta^2\right)^{3/2}} \quad (12)$$

И заместим δ с $D/4$ в (12) ще получим:

$$k(D/4) = \frac{D^2}{\left(D^2 + 4\left(\frac{D}{4}\right)^2\right)^{3/2}} \quad (13)$$

Или: $k(D/4) = 0.715$, което е много близко да границата от 0,7. Ако продължаваме да увеличаваме, коефициента на магнитна връзка ще продължава да намалява по експоненциален закон. При ($\delta = D/3$) $k(D/3) = 0.576$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. От представените механични варианти на предавателната и приемната част на ИБПЕЕ се вижда, че подвижна приемна част и подвижна или частично движеща се предавателна част осигурява всички възможни степени на свобода на системата. Това води до голямо усложняване на механичната част на системата и практически е много трудно осъществимо.

2. От представените конструктивни мерки за увеличаване на разстоянието в т. 2.2 може да се направи извода, че планарната намотка осигурява най-добро разпределение на магнитния поток по направление на оста Z.

3. От разгледаните видове магнитопроводи в т. 2.2 може да се направи извода, че при всеки от тях при увеличаване на въздушната междина (преместване по оста Z) разсеяния магнитен поток се увеличава и взаимната индуктивност между предавателната и приемната бобина намалява.

4. От представените схемотехнични мерки се стига до заключението, че най-голяма ефективност имат ИБПЕЕ със N-S, S-S и S-P схеми за компенсация, тъй като зависимостите за ефективността (6, 9 и 11) в знаменателя не взема участие съпротивлението на приемната бобина.

5. От представените зависимости (12 и 13) се вижда, че независимо от схемите за компенсация не може да се увеличи разстоянието на предаване по оста Z над $D/4$, защото коефициента на магнитна връзка пада под критичният минимум от 0,7, при което не може да се постигне ефективност на системата над 85%.

БЛАГОДАРНОСТИ: *Този докладе финансиран от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни из-следвания, иновации и дигитализация за интелигентна трансформация“ 2021-2027 г., Проект № BG16RFPR002-1.014-0005 Център за компетентност "Интелигентни мехатронни, еко- и енергоспестяващи системи и технологии“*

ЛИТЕРАТУРА

[1] L. Summer, P. Oisi, “Concepts for wireless energy transmission via laser” International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), January 2009, DOI: 10.2478/pead-2021-0010

[2] S. Sulthan, K. Ramasamy K., T. Shanmuganantham, "Wireless Power Transmission - A Next Generation Power Transmission System", International Journal of Computer Applications 1(13):102-105, February 2010, DOI:10.5120/274-434

[3] M. Kline; I. Izyumin; B. Boser; S. Sanders, "Capacitive power transfer for contactless charging", 2011 Twenty-Sixth Annual IEEE APEC, 06-11 March 2011, DOI: 10.1109/APEC.2011.5744775

[4] T. Imura, “Wireless Power Transfer”, Book, Springer, DOI: 10.1007/978-981-15-4580-1

[5] Shinohara, N., “Wireless Power Transfer-Theory, technology and applications”, The Institution of Engineering and Technology.

[6] Clerckx, B., Kim, J., Choi, K.W., et al. Foundations of wireless information and power transfer: Theory, prototypes, and experiments. Proc. IEEE, 110, 8-30. Electron. 9, 4932-4946, 2022.

[7] A. Triviño-Cabrera, J. González-González, J. Aguado "Wireless Power Transfer for Electric Vehicles: Foundations and Design Approach", Book, Springer, DOI: 10.1007/978-3-030-26706-3

[8] N. Madzhzrov, D. Iliev, “Analysis of Magnetic Flux Density in a Model of an Inductive- Resonance Energy Transfer System”, PCIM Europe 2022, 10-12.05.2022, Nurnberg, Germany. DOI: 10.30420/565822233,

[9] N. Madzharov,” Wireless power transmitters for electrical energy”, Gabrovo, 2017, ISBN:978-954-683-569-7.