

ЕЛЕКТРИЧЕСКИ, МЕХАНИЧНИ И ФИЗИЧЕСКИ ПАРАМЕТРИ НА БЕЗКОНТАКТНИТЕ СИСТЕМИ ЗА ПРЕНОС НА ЕЛЕКТРИЧЕСКА ЕНЕРГИЯ

Десислав Илиев*, Николай Маджаров

Технически университет, Габрово, България

*Кореспондиращ автор: d.iliev@tugab.bg

ELECTRICAL, MECHANICAL AND PHYSICAL PARAMETERS OF WIRELESS POWER TRANSFER SYSTEM

Desislav Iliev*, Nikolay Madzharov

Technical University of Gabrovo, Gabrovo, BG

*Corresponding author: d.iliev@tugab.bg

Abstract

The purpose of this work is to assess the level of development of Wireless Power Transfer System (WPTS) to date and to define the areas of application and the possibilities for their further improvement. Four types of WPTS are considered: Microwave WPTS, Optical (Laser) WPTS, Capacitive WPTS and Inductive WPTS. From the review, it was concluded that the best technical – operational and technical - economic parameters are Inductive WPTS. They are the subject of this work, and their main advantages and disadvantages are presented.

Keywords: Wireless Power Transfer, Efficiency, Radiative type, Not Radiative Type.

ВЪВЕДЕНИЕ

С развитието на технологиите стана възможно безконтактното предаване на електрическа енергия да излезе от етапа на научни проучвания и експериментални изследвания и да намери широко приложение. В момента на съществуват много маломощни безконтактни предаватели на електрическа енергия (БПЕЕ), които са намерили широко разпространение: безконтактни зарядни за телефони, лаптопи и таблети, както и други електрически устройства за битови нужди със сравнително малка мощност. Редица учени и фирми правят проучвания и успешни разработки за въвеждане в експлоатация на безконтактни предаватели на електрическа енергия за по-

големи мощности, като целта им е чрез тях да се осъществяват или зареждане на акумулаторни батерии, или да се осъществява пренос на енергия на определено разстояние и задвижване на дадено устройство в реално време, или да се осъществява едновременно задвижване на даден механизъм и зареждане на акумулаторните батерии. Това е свързано с определена мощност, която да се предава безконтактно, като тя може да бъде сравнително малка, ако става дума само за зареждане на акумулаторните батерии и да се увеличи значително в случаите, когато има нужда от едновременно задвижване на дадено устройство и да се зареждат и акумулаторните батерии на това устройство.

ИЗЛОЖЕНИЕ

БПЕЕ могат да се разделят на два основни вида според вида на електромагнитното поле, което използват. Първата група използват далечното електромагнитно поле (Radiative type), а втората група използват близкото електромагнитно поле (Not Radiative type, Coupling type) (Фиг. 1). В първия случай енергията от предавателя се излъчва в пространството безвъзвратно, без значение дали излъчената енергията ще се приеме от приемника на устройството, а във втория случай за да настъпи пренос на енергия, трябва да е наличен приемник (в следствие на това, че близкото електромагнитно поле е консервативно) [1,2].



Фиг. 1. Видове БПЕЕ според вида на електромагнитното поле, което използват за пренос на енергия.

От своя страна БПЕЕ, използващи далечното електромагнитно поле, могат да се разделят на две групи: БПЕЕ, използващи микровълновия диапазон на електромагнитните вълни (300 MHz- 300 GHz) и БПЕЕ, използващи оптичния диапазон на електромагнитните вълни (от инфрачервената до ултравиолетовата част на спектъра (от 3 до 1000 THz) (Фигура 1.).

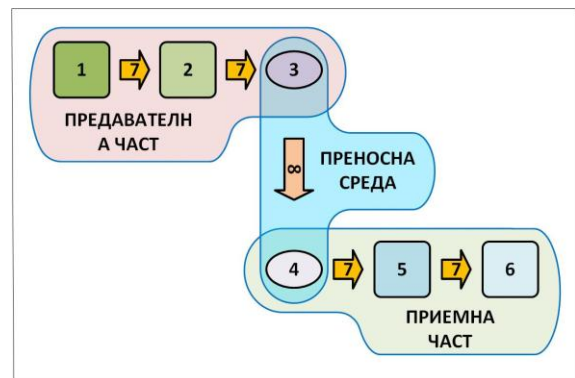
БПЕЕ, използващи близкото електромагнитно поле се разделят на такива, използващи магнитно поле (индуктивен метод и индуктивно-резонансен метод), и такива използващи електрическо поле (капацитивен метод и капацитивно-резонансен) (Фигура 1.).

Независимо от вида на БПЕЕ, конструктивно те могат да се разделят на две части- предавателна и приемна част.

Между двете части е средата, през която безконтактно се предава енергия. Преносната среда оказва голямо влияние върху работата на БПЕЕ.

Предавателната част на БПЕЕ се състои от източник на енергия, преобразувател на енергия, съгласуващи елементи и предавател, чрез който се излъчва енергията в пространството.

Приемната част се състои от приемник, който служи да приеме излъчената от предавателя енергия, преобразувател на енергия, съгласуващи елементи и товар (акумулаторна батерия, консуматор и др.) (Фиг. 2).



Фиг. 2. Принципно блок схема на система за безконтактен пренос на енергия: 1- източник на енергия, 2-преобразовател на енергия и съгласуващи елементи, 3- предавател, 4- приемник, 5-преобразовател на енергия и съгласуващи елементи, 6- товар, 7-посока на енергията (в повечето случаи електрическа) и 8- безконтактен пренос на енергия.

1 БПЕЕ, ИЗПОЛЗВАЩИ ДАЛЕЧНОТО ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ПОЛЕ

1.1 МИКРОВЪЛНОВИ БПЕЕ.

Микровълновият метод използва електромагнитни вълни в диапазона от 300 MHz до 300 GHz. В зависимост от предназначението на този вид БПЕЕ, и в най-голяма степен от пренасяната от системата мощност, някои блокове могат да липсват, или да са променени (Фиг. 2) [3].

1.1.1 Физически и механични параметри на микровълновите БПЕЕ.

Предавателна част.

Източник на енергия. За източници на енергия могат да се използват електропреносната мрежа, или друг вид източници на енергия (преобразуватели на химическа в електрическа енергия). Източника на енергия се избира според специфичните характеристики на Микровълновия БПЕЕ.

Преобразувател на електрическата енергия в микровълнова. Обикновено за тази цел се използват вакуумни устройства (магнетрони, клистриони, жиротрони и др.), които и до момента остават незаменими при по-големи честоти (над 3- 4 GHz) и по-големи мощности- над 1-1,5 kW. В последните няколко години с напредването на технологиите в преизводството на полупроводникови елементи, при които стана възможно повишаване на работната честота и работните напрежения и токове на ключовите елементи (с разработването на нови видове SiC и GaN MOSFET транзистори), се правят опити за заместването на вакуумните устройства с полупроводникови елементи.

Вълноводна линия. Обикновено генератора на микровълново излъчване е отдалечен на известно разстояние от предаващото устройство (предавател). Поради тази причина между тях се разполага вълноводна линия, която освен основната си функция- пренос на електромагнитната енергия от източника до излъчвателя има и още две функции- да предотврати връщането на енергия към източника в следствие на редица физични процеси (интерференция, дифракция, отражение и др.) и за изравняване на изходния и входния импеданс между генератора и предавателя.

Предавател. Най-често използваните предавателни устройства (или предаватели) са параболичните антени в различните им разновидности, които се използват при предаването на големи мощности и при пренос на енергия на големи разстояния.

Други видове предаватели, които се използват са microstrip или patch антени

(или комбинация от двете). Те се използват за пренос на енергия на малки дистанции и малки мощности.

Приемна част.

Приемник. В някои случаи се използват параболични антени с характеристики на предавателните антени.

Ако параболичната антена се замени с изправителна антена (Receiving Antenna), част от системите, включени в приемния могат да се премахнат, тъй като тяхната функция се поема от изправителната антена.

Консуматор. В зависимост от приложението на Микровълновите БПЕЕ, като товар може да служат различни видове електрически консуматори (електрически двигатели, осветителни тела и др.), които могат да използват директно получената електрическа енергия. В други случаи електрическата енергия може да се използва за зареждане на акумулаторни батерии. Съществуват и системи, при които се използва комбинация от предходните два вида консуматори.

Преносна среда.

В повечето случаи Микровълновите БПЕЕ се проектират да се използват за наземни цели. Поради тази причина преносната среда е въздух. Неговите физични характеристики оказват влияние на електромагнитното лъчение. Най-важната характеристика на средата е свойството да поглъща електромагнитните вълни. Степента на поглъщане зависи и от честотата на електромагнитното излъчване.

1.1.2 Електрически параметри на микровълновите БПЕЕ.

Ефективността на този вид БПЕЕ е един от най-важните характеристики. Пълната ефективност на системата (η_{MPT}), или съотношението на мощността, отдадена в товара (P_{out}) към мощността, консумирана от захранващия източник (P_{in}) на системата може да се дефинира по следния начин (1):

$$\eta_{MPT} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \eta_g \cdot \eta_t \cdot \eta_s \cdot \eta_r \cdot \eta_d \quad (1)$$

Където: η_{MPT} - пълна ефективност на системата, P_{out} - мощност, отдадена в товара, P_{in} - мощност, консумирана от източника, η_g - ефективността при преобразуване на постоянната мощност в променлива микровълнова мощност (ефективност на DC/AC преобразувателя), η_t - ефективност на предавателя, η_s - ефективност при прехвърляне на енергията през преносната среда, η_r - ефективност на приемника, η_d - ефективност на преобразуване на променливата мощност в постоянна (ефективност на AC/DC преобразувателя).

1.1.3 Предимства и недостатъци.

Основните предимства на този метод са възможност за пренос на големи мощности, възможност за пренос на енергия на голяма дистанция, голяма плътност на енергията..

Основните недостатъци на този вид метод са, че енергията се излъчва от предавателя безвъзвратно в пространството, голямата плътност на енергийния поток създава предпоставки за неблагоприятно влияние върху различни обекти (включително и живи организми). Необходимост от много добро насочване и позициониране на предавателя и приемника на системата. Преносната среда оказва много голямо влияние върху ефективността на този вид система. Малка ефективност на системата (обикновено в рамките на 20 до 40 %).

1.2. ОПТИЧНИ БПЕЕ.

Лазерния метод използва електромагнитни вълни в оптичния диапазон, както и в инфрачервената, и в ултравиолетовата област (от около 100 THz до 1000 THz) [4].

1.2.1 Физически и механични параметри на оптичните БПЕЕ.

Предавателна част.

Източниците на енергия. За този вид системи са същите, както и при микровълновите БПЕЕ.

Преобразовател на електрическата енергия в оптично лъчение. Като преобразовател на електрическата енергия в оптична обикновено се използват два типа лазери- полупроводникови лазери и твърдотелни лазери.

Устройство за насочване на оптичното лъчение. Независимо от вида на лазера, който се използва като предавател в Оптичните БПЕЕ, лазерния сноп трябва да се насочи в пространството към приемника (фотоволтаичните клетки). В зависимост от мощността на оптичното лъчение се използват различни оптични системи, които могат да включват в себе си огледала, призми и лещи.

Приемна част.

Приемно устройство. До момента единственият приемник при оптичните БПЕЕ са фотоволтаичните клетки. Те превръщат оптичното излъчване директно в електрическа енергия (по подобие на ректените в микровълновите БПЕЕ). В следствие на несъвършенствие на източниците на оптично лъчение и влиянието на преносната среда, оптичния сноп не е с идеална форма. Има много разработки на фотоволтаични панели с различна форма, чиято цел е да намали влиянието на по-горните недостатъци.

Консуматор (товар). Консуматорите в Оптичната БПЕЕ са същите като при Микровълновите БПЕЕ.

Преносна среда.

Тя е същата като при микровълновите БПЕЕ. Но поради значително по-малката дължина на електромагнитните вълни при Оптичните БПЕЕ ефективното разстояние на предаване може да се намали значително.

1.2.2 Електрически параметри на Оптичните БПЕЕ.

Пълната ефективност на Оптичните БПЕЕ (η_{LPT}), или мощността, отдадена в товара (P_{IN}) към мощността, консумирана от източника (P_{OUT}) на енергия за

системата може да се определи с помощта на (2):

$$\eta_{LPT} = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \quad (2)$$

Където: η_{LPT} - пълна ефективност на системата, P_{IN} - мощност, отдадена в товара, P_{OUT} - мощност, консумирана от източника;

η_1 - ефективност при преобразуване на електрическата мощност на източника в захранваща мощност на източника на светлина (лазер), η_2 - ефективност на източника на светлина (лазер), η_3 - ефективност при прехвърляне на енергията през преносната среда, η_4 - ефективност на приемника (фотоволтаичните клетки), η_5 - ефективност на DC/DC преобразувателя.

1.2.3. Предимства и недостатъци.

Основните предимства на този метод са възможност за пренос на много големи мощности, възможност за пренос на енергия на много голяма дистанция и много голяма плътност на енергията.

Основните недостатъци на този вид метод са абсолютно същите като при микровълновия. Като ефективността на системата е още по-малка (10-15%).

2 БПЕЕ, ИЗПОЛЗВАЩИ БЛИЗКОТО ЕЛЕКТРОМАГНИТНО ПОЛЕ

2.1 КАПАЦИТИВНИ БПЕЕ.

Капацитивните БПЕЕ използват електрическото поле, което се създава между плочите на предавателя и приемника на системата, като напрежението, който създава това електрическо поле е променливо. По този начин се прехвърля енергия от предавателната към приемната част на системата за безконтактен пренос на енергия. Съществуват две разновидности на капацитивните БПЕЕ - с две кондензаторни плочи и четири кондензаторни плочи [5].

2.1.1 Физически и механични параметри на Капацитивните БПЕЕ.

Предавателна част.

Източник на енергия. Той е идентичен с описаните по-горе БПЕЕ.

Преобразувател на енергия и система за съгласуване. Тя служи да преобразува захранващото напрежение на източника в необходимото напрежение по амплитуда и честота. Съществуват два типа системи. Единият вид са без система за съгласуване, а другият вид са със система за съгласуване. Ако се използва система за съгласуване се увеличава КПД на системата и тя може да работи при различни товари.

Предавател.

При този вид системи за предавател служи специално конструирана метална плоча (или пластини), чиято форма и размери се подбират в зависимост от конкретния случай. За изграждането и може да служат всякакви проводими материали.

Приемна част.

Приемник. Обикновено той е идентичен с предавателя.

Преобразователен блок и система за съгласуване. Този блок служи да преобразува полученото променливо напрежение и ток в постоянни такива и допълнително да съгласува изходния импеданс на системата с този на товара.

Консуматор (товар). Консуматорите в Капацитивните БПЕЕ са същите, като при Микровълновите БПЕЕ.

Преносна среда. Преносната среда при Капацитивните БПЕЕ може да бъде въздух, вода или друг вид. Капацитивните БПЕЕ рядко се разработват, за да работят във Вакуум (космически приложения). Голямо влияние върху работата на този вид БПЕЕ оказва електрическата проникваемост на средата. При по-големи стойности на проникваемостта се увеличава и КПД на системата. Поради тази причина Капацитивните БПЕЕ много често се разработват за работа във водна среда, като по-голямата концентрация на разтворени соли във водата (морска и

океанска вода), увеличават КПД на системата. Много важна характеристика на Капацитивните БПЕЕ е това, че те почти не се влияят от различни по-големи обекти (метални или неметални), намиращи се в преносната среда между предавателя и приемника.

2.1.2 Електрически параметри на Капацитивните БПЕЕ.

Ефективността на Капацитивните БПЕЕ (η_{CPT}) може да се изчисли с помощта на (3):

$$\eta_{CPT} = \frac{k_C^2 \cdot Q_{C1} \cdot Q_{C2}}{\left(1 + \sqrt{1 + k_C^2 \cdot Q_{C1} \cdot Q_{C2}}\right)^2} \quad (3)$$

Където: η_{CPT} - коефициент на капацитивна връзка, k_C - взаимен капацитет между предавателя и приемника, Q_{C1} - взаимен капацитет между първата двойка пластини на предавателя и приемника, Q_{C2} - взаимен капацитет между втората двойка пластини на предавателя и приемника.

2.1.3 Предимства и недостатъци.

Основните предимства на този вид метод са, че енергията се предава само при наличието на приемник в системата в следствие на консервативността на електрическото поле. Опростена конструкция. Слабо влияние върху околната среда и живи обекти, ако са предприети съответните мерки при конструирането му. В по-вече случаи чужди обект, попаднали между предавателя и приемника (в преносната среда), не оказват съществено влияние върху работата на системата.

Основните недостатъци на този вид метод са, че пренос на енергия на много малки разстояния. За да се увеличи разстоянието, на което се пренася енергията, се налага да се увеличи работното напрежение на системата, което води до непосредствени рискове за живота и

здравето на живи организми, както и голямо влияние върху близко разположени обекти. Малка мощност (най-малката мощност от всички видове БПЕЕ)- до няколко десетки вата.

2.2 ИНДУКТИВНИ БПЕЕ.

Индуктивните БПЕЕ 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. Това е основният вид индуктивна БПЕЕ, при която съществува едно основно ограничение- при увеличаване на разстоянието, на което се прехвърля енергия на по-вече от $\frac{1}{4}$ от диаметъра на предавателната и приемната намотка (D), ефективността на системата рязко спада под 20% [6].

2.2.1 Физически и механични параметри на индуктивните БПЕЕ.

Предавателна част.

Източник на енергия. Той идентичен с представените по-горе безконтактни системи за пренос на енергия.

Преобразувател на енергия и система за съгласуване. Той служи да преобразува захранващото напрежение на източника в необходимото напрежение по амплитуда и честота за работа на системата и да го подаде на индуктивния елемент, служещ за предавател. Както и при представените по-горе Капацитивни БПЕЕ, съществуват два вида системи. Единия вид са Индуктивни БПЕЕ, при които не се използва система за съгласуване. Недостатък на този вид система е, че е с малка ефективност, разстоянието на предаване и мощността е малка. За да се подобри ефективността на Индуктивните БПЕЕ, в системата се вграждат допълнителни елементи- кондензатори, които работят паралелно или последователно на предавателната или приемната намотка. Когато кондензатора е свързан последователно на бобината, се означава

с S (от английски последователно), а когато е свързан паралелно на бобината с P (от английски паралелно).

Предавател

Предавателя на Индуктивните БПЕЕ представлява бобина с определена индуктивност. Тази бобина може да се конструира с различни форми и размери, в зависимост от предназначението на Индуктивната БПЕЕ.

Приемна част.

Приемник. Той е идентичен с предавателя. Физическите и електрическите изисквания към него са същите, каквито са и за предавателя.

Преобразувател на енергия и система за съгласуване. Тя служи да преобразува полученото от приемника променливо напрежение и ток в постоянни такива, както и да ги съгласува с товара. Както и при системата за съгласуване в предавателната част и тук може да имаме два варианта- с и без система за съгласуване.

Консуматор (товар). Консуматорите в Индуктивните БПЕЕ са същите като при Микровълновите БПЕЕ.

Преносна среда.

Преносната среда при Индуктивните БПЕЕ е същата, както при капацитивните БПЕЕ. Основно тези системи се разработват за работа във въздушна или водна среда. Магнитната проникваемост на средата оказва голямо влияние на този вид системи.

Също така наличието на обекти между предавателя и приемника оказват много голямо влияние върху работата на този вид системи. Наличието на метални обекти значително намалява ефективността на системата, а в следствие на индукцията тези обекти могат да се загряват значително.

Наличието на живи обекти между предавателя и приемника също оказват голямо влияние на системата, а влиянието на магнитното излъчване върху тях е нежелателно и вредно.

2.2.2 Електрически параметри на Индуктивните БПЕЕ.

Максималната ефективност на системата (η_{MAX}) може да се изчисли с помощта на (4)

$$\eta_{MAX} = \frac{k_M^2 \cdot Q_T \cdot Q_R}{\left(1 + \sqrt{1 + k_M^2 \cdot Q_T \cdot Q_R}\right)^2} \quad (4)$$

Където: η_{MAX} - максимална ефективност на системата, k_M - коефициент на магнитна връзка между предавателната и приемната намотка, Q_T - качествения фактор на предавателната намотка, Q_R - качествения фактор на приемната намотка.

2.2.3 Предимства и недостатъци.

Основните предимства на този вид метод са, че енергията се предава само при наличието на приемник в системата в следствие на консервативността на магнитното поле. Сравнително опростена конструкция. Слабо влияние върху околната среда и живи обекти, ако са предприети съответните мерки при конструирането му. Голяма мощност (до няколко десетки киловата). Голяма ефективност (най-голямата ефективност от всички видове БПЕЕ)- до 90%.

Основните недостатъци на този вид метод са, че чужди обект, попаднали между предавателя и приемника (в преносната среда), оказват съществено влияние върху работата на системата и в следствие на магнитната индукция могат да повишат значително температурата си. Ако разстоянието между предавателя и приемника се увеличи по-вече от $\frac{1}{4}$ от диаметъра на предавателната (респективно приемната намотка), ефективността на системата рязко спада под 20%.

Таблица 1. Сравнение на видовете БПЕЕ според някои основни характеристики

Вид БПЕЕ	Работна честота	Разстояние на предаване	Ефективност	Област на приложение	Предимства	Недостатъци
Микровълнов	300 MHz до 300 GHz	Голямо стотици km	Ниска (до 40%)	Космически технологии, безпилотни наземни и въздушни апарати	Голямо разстояние на предаване	влияние върху чужди обекти чувствителност към характеристиките на преносната среда, големи производствени разходи, ниска ефективност
Оптичен	100 THz до 1000 THz	Голямо стотици km	Много ниска (до 15%)	космически технологии, безпилотни наземни и въздушни апарати	Голямо разстояние на предаване, много добра насоченост в пространството	Много голямо влияние върху чужди обекти, мно-го голямо влияние на преносната среда, много ниска ефективност
Капацитивен	До няколко GHz	Малко няколко cm	Средна (до 80%)	мобилни устройства, медицински импланти, различни превозни средства	опростена конструкция, ниски производствени разходи, позволява размятане между предавателя и приемника	Проста конструкция, ниски производствени разходи, позволява размятане между предавателя и приемника в широки граници
Индуктивен	От 10 kHz до 5 GHz	Средно до 1 m	Висока (до 90%)	мобилни устройства, медицински импланти, различни превозни средства	опростена конструкция, ниски производствени разходи, високо ниво на безопасност, много добра ефективност	Сравнително малко разстояние на предаване, спадане на ефективността при разминаване на предавателя и приемника, интерференция с други устройства

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разгледани са четирите основни метода за БПЕЕ, техните основни физически и електрически параметри. Натази база е направено е обобщение на техните основни предимства и недостатъци. От представения обстоен преглед на БПЕЕ може да се направи извода, че Индуктивните БПЕЕ са с най-добрите технически и икономически характеристики към настоящия момент на развитие на технологиите.

Източник на финансиране: Това изследване е финансирано от Европейския фонд за регионално развитие в рамките на ОП „Научни изследвания, 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“, проект НИП2025-16.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Shinohara, N. , “Wireless Power Transfer Theory, technology and applications”, The Institution of Engineering and Technology.
- [2] 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.
- [3] Литературен източник. Литературен източник. Литературен източник. Zhu, X., Jin, K., Hui, Q., et al. “Long-range wireless microwave power transmission: A review of recent progress”, IEEE J. Sel. Topics Power, 2021.
- [4] Mohsan, S.A.H., Qian, H., and Amjad, H., “A comprehensive review of optical wireless power transfer technology”. Front Inform Tech El 24, 767-800, 2023.
- [5] Liu, C. (2011). Fundamental Study on Capacitively Coupled Contactless Power Transfer Technology (ResearchSpace@ Auckland), 2011.
- [6] Kurs, A., Karalis, A., Moffatt, R., et al,” Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances”, Science 317, 83-86, 2007.