

СУМІЩЕННЯ ЗАСОБІВ СХЕМОТЕХНІЧНОГО ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ В ЗАДАЧАХ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ

© Хома В. В., Кеньо Г. В., 2013

Висвітлено питання сумісного використання засобів схемотехнічного і фізико-технічного моделювання для вирішення завдань у галузі інформаційної безпеки. Як приклад наведено застосування програмних пакетів комп'ютерного моделювання (PSPICE і COMSOL Multiphysics) під час проектування системи радіочастотного розпізнавання (RFID).

The paper discusses principles of combined use of circuits engineering and physical engineering simulations in the information security area. As an example, RFID system design based on CAD software (PSPICE and COMSOL Multiphysics) is presented.

Вступ

Розроблення засобів електронної обчислювальної техніки (ЕОТ), що застосовуються для оброблення та захисту інформації, є складним ітераційним процесом, що містить етапи проектування принципової схеми, синтезу і виготовлення друкованої плати, проведення випробовувань та доопрацювання проекту за результатами випробувань. Для підвищення ефективності розроблення пристроїв ЕОТ застосовують системи автоматичного проектування (САПР), які на основі принципової схеми можуть не лише синтезувати друковану плату, верифікувати топологію з'єднань, виготовити конструкторську документацію, але також провести імітаційне моделювання роботи пристрою з метою оптимізації параметрів схеми.

У міру підвищення складності схемотехніки та ступеня мініатюризації сучасних пристроїв ЕОТ, а також розширення діапазону робочих частот розробникам щораз важче враховувати взаємовпливи і різні “паразитні” ефекти, що виникають в електронних компонентах і провідниках друкованих плат. Це збільшує кількість ітераційних поправок проекту, необхідних до виконання вимог технічного завдання, а відтак видовжує термін розробки. Іншою серйозною перешкодою на шляху забезпечення достовірних результатів імітаційного моделювання є застосування у проекті нових оригінальних компонентів, які не представлені у бібліотеках моделей. Параметри моделей оригінальних компонентів можна одержати засобами фізико-технічного моделювання.

Метою роботи є представлення можливості поєднання систем схемотехнічного моделювання і оптимізації PSPICE та програмного пакета фізико-технічного моделювання COMSOL Multiphysics на прикладі проектування блоку живлення транспондера системи RFID.

Короткий опис технології RFID

Радіочастотне розпізнавання (Radio Frequency Identification – RFID) – це метод, що ґрунтується на використанні радіохвиль не лише як носія інформативних сигналів, але і як джерела електричної енергії, необхідної для живлення пасивної електронної мітки, закріпленої за об'єктом ідентифікації [1]. Система RFID (рис. 1) складається із двох пристроїв: зчитувача (англ. reader) і пасивної радіомітки (транспондера).

Зчитувач містить передавач, приймач із декодером та одну передавально-приймальну або дві – передавально та приймальну – антени. Зазвичай зчитувач має інтерфейс, наприклад, RS-232,

USB, для зв'язку із зовнішніми пристроями (комп'ютером, електромеханічним замком тощо). RFID-мітка містить безкорпусний CMOS-чип та приймально-передавальну антену.

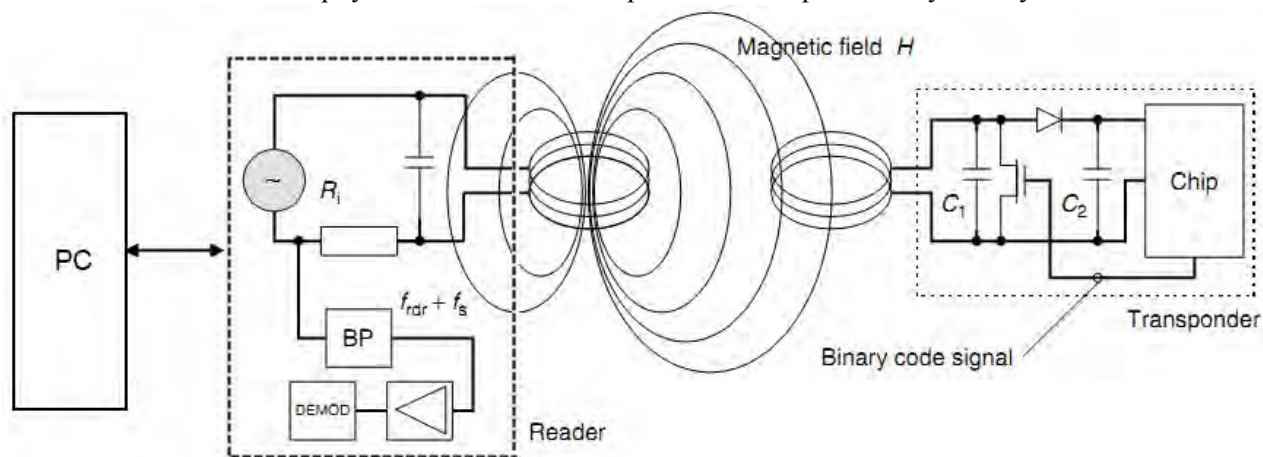


Рис. 1. Функціональна схема системи RFID [1]

Зчитувач через антену формує електромагнітні хвилі, а також тією ж або іншою антенною приймає радіосигнали, які далі фільтруються та декодуються, щоб відтворити ідентифікаційні дані радіомітки. Пасивні транспондери не мають власного джерела живлення, але коли знаходяться в електромагнітному полі резонансної частоти свого приймального контуру, у вбудованому конденсаторі з ємністю кілька мікрофарад нагромаджується енергія, достатня для живлення вбудованого CMOS-чипу та передавання у відповідь сигналу із кодом радіомітки.

Зчитувач передає електромагнітні хвилі в імпульсному режимі, тому радіомітки відповідають лише у момент паузи. Кожна радіомітка відгукується із деякою затримкою, але якщо після відповіді на мітку і надалі діє електромагнітне поле, вона не діятиме впродовж певного часу, що уможливорює зчитування даних із багатьох транспондерів, що одночасно знаходяться у зоні дії зчитувача.

Найпростіші низькочастотні системи RFID працюють на частотах 120–150 кГц і дають змогу зчитувати дані транспондера з відстані до півметра. Складніші системи дають змогу не лише зчитувати, але і записувати дані до транспондера. Високочастотні RFID-системи працюють на частоті 13,56 МГц, забезпечуючи покриття до одного метра, а надвисокочастотні (865–868 МГц) забезпечують покриття до двох метрів.

У таблиці наведено відомості про основні характеристики типових RFID-систем, а на рис. 2 – потенційно придатні та застосовувані на практиці частоти, на яких працюють сучасні RFID-системи.

Основні характеристики типових RFID-систем

Частотний діапазон	Тип антени	Дальність дії	Напрявленість
НЧ (120-400) кГц	Котушка (>100 витків)	Кілька дециметрів	Мала
СЧ (4-24) МГц	Котушка (<10 витків)	Порядку метра	Незначна
ВЧ (>900) МГц	Дипольна антена	Більше метра	Дуже висока

Для RFID-систем, що працюють на низьких та середніх частотах, застосовують індуктивно зв'язані антени зчитувача-транспондера.

Опис індуктивно зв'язаних антен системи RFID

Принцип індуктивного зв'язку між антенами зчитувача і транспондера пояснюється законом електромагнітної індукції Фарадея (рис. 3). Коли електричний струм в антені зчитувача змінюється, це призводить до утворення у навколишньому просторі змінного магнітного поля. Змінний магнітний потік через контур розташованої поблизу антени транспондера зумовлює виникнення у цій антені електрорушійної сили (т.з. індукованої ЕРС).

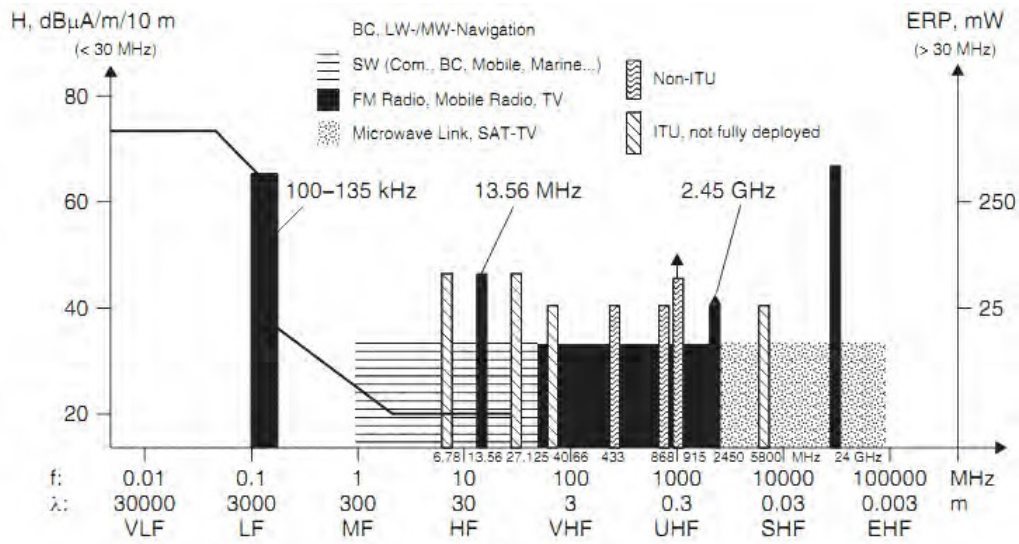


Рис. 2. Придатні і застосовувані на практиці частоти у технології RFID [1]

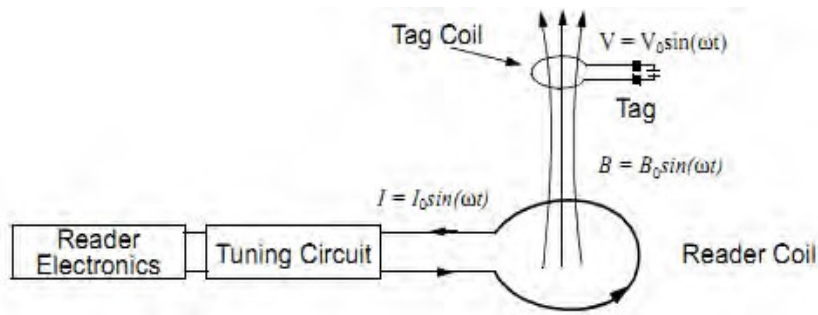


Рис. 3. Фізичні засади утворення сигналу на антені транспондера [1]

Рівень індукованої в антені транспондера ЕРС залежить від багатьох чинників, насамперед: від взаємної орієнтації площин антен зчитувача і транспондера, а також від їх віддаленості одна від однієї. Рис. 4 ілюструє зони опитування зчитувача за паралельного та перпендикулярного розташування антени транспондера.

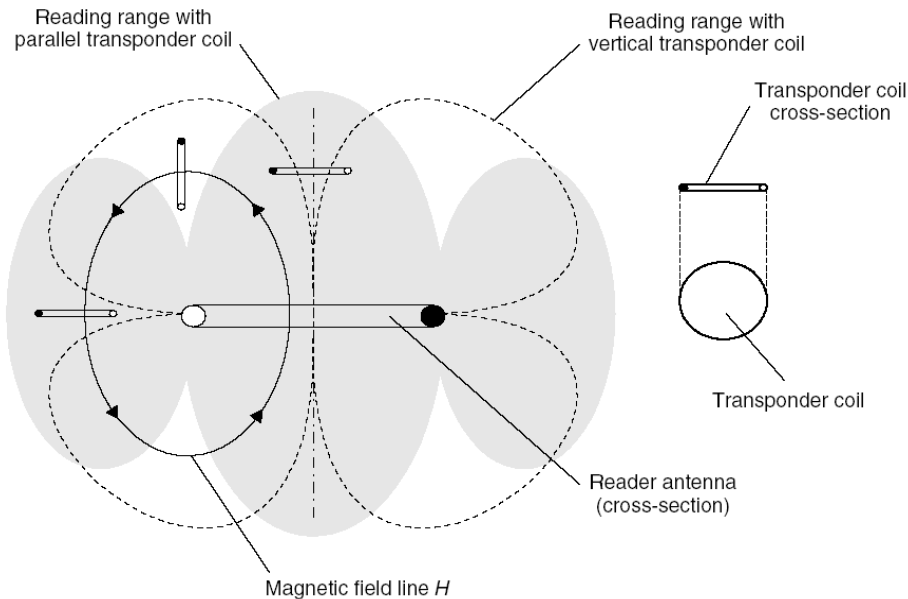


Рис. 4. Зони опитування зчитувача за паралельного та перпендикулярного розташування антени транспондера [2]

Для схемотехнічного моделювання системи RFID потрібно визначити значення індуктивності L антен та коефіцієнта індуктивного зв'язку k .

Визначення параметрів індуктивно зв'язаних антен

Котушка індуктивності, яка водночас є і антеною транспондера, виготовляється у вигляді концентричних прямокутників на друкованій платі (рис. 5). Розрахункове значення індуктивності можна розрахувати за формулою Гровера [2]:

$$L_{Gr} = \sum_{k=1}^S L_k + M,$$

де S – кількість сегментів; M – взаємна індуктивність між сегментами; L_k – індуктивність кожного сегмента, значення якої можна обчислити за формулою:

$$L_k = 0,002 \cdot l \left[\ln \left(\frac{2l}{w+h} \right) + 0,50049 + \frac{w+h}{3l} \right],$$

де l , w і h – трек завдовжки, завширшки і завтовшки відповідно.

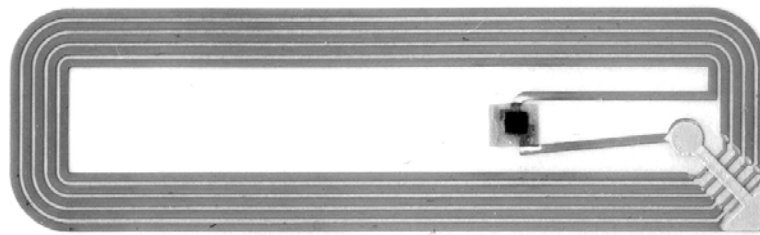


Рис. 5. Вигляд антени транспондера [1]

Необхідне значення індуктивності антени зчитувача розраховують із міркувань забезпечення резонансу на робочій частоті RFID-системи. Якщо відома робоча частота f , то для заданої ємності конденсатора C за формулою Томсона можна розрахувати значення індуктивності:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C}.$$

Для проектування RFID-системи, окрім індуктивності антен зчитувача і транспондера, ще одним важливим параметром є взаємна індуктивність M (рис. 5) або похідний параметр – коефіцієнт індуктивного зв'язку:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}.$$

Коефіцієнт k може набувати значень від:

- $k=0$ – для незв'язаних контурів (велика віддаль чи магнітний екран);
- $k=1$ – для тісно зв'язаних контурів, як у обмотках трансформатора.

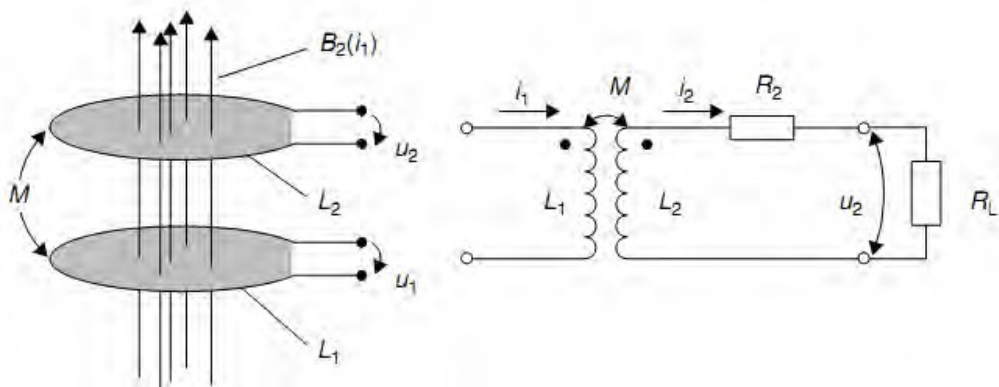


Рис. 5. Схемотехнічна модель індуктивно зв'язаних контурів

Значення коефіцієнта індуктивного зв'язку спроектованих RFID-системи можна також виміряти, застосовуючи наведену на рис. 6 схему.

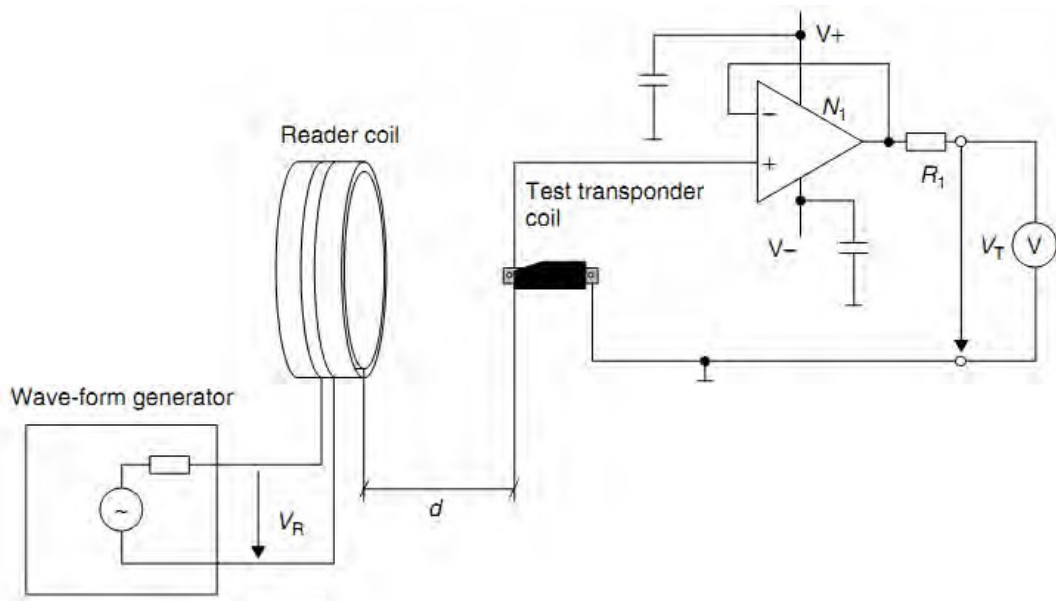


Рис. 6. Схема вимірювання коефіцієнта індуктивного зв'язку [2]

Значення коефіцієнта розраховують на основі вимірної напруги транспондера за формулою:

$$k = A_k \cdot \frac{U_T}{U_R} \cdot \sqrt{\frac{L_R}{L_T}},$$

де

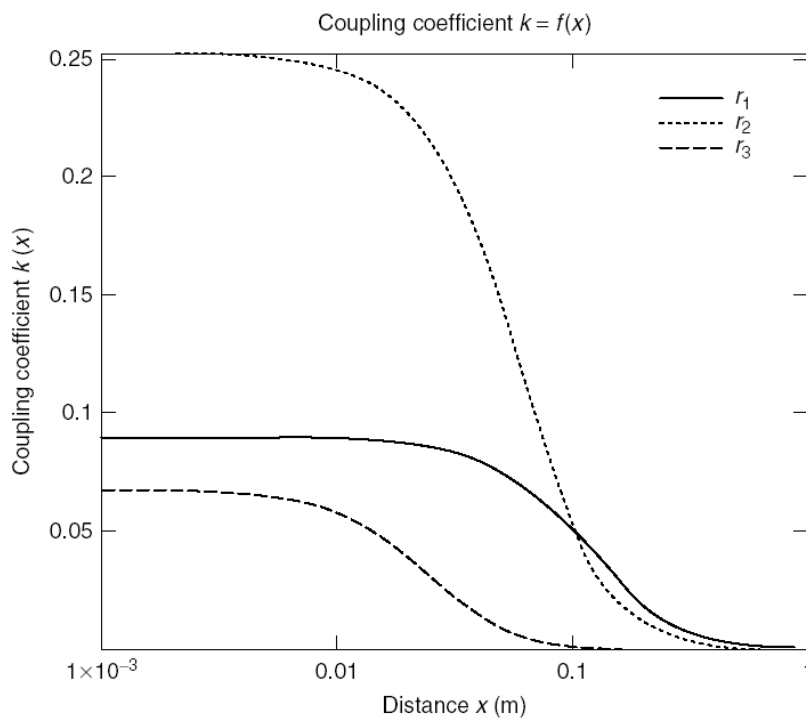


Рис. 7. Залежність коефіцієнта індуктивного зв'язку від віддалі [3]:
 Радіус антени зчитувача: $r_1 = 10$ см; $r_2 = 7,5$ см; $r_3 = 1$ см
 Радіус антени транспондера $r = 2$ см

Проектування кола живлення RFID-мітки і створення PSpice-моделі

Наведена на антені транспондера EPC є джерелом електричної енергії, яка нагромаджується в акумулюючому конденсаторі, що надалі відіграє роль тимчасового елемента живлення електронної частини транспондера. На рис. 8 наведено епюри напруг заряду-розряду акумулюючого конденсатора.

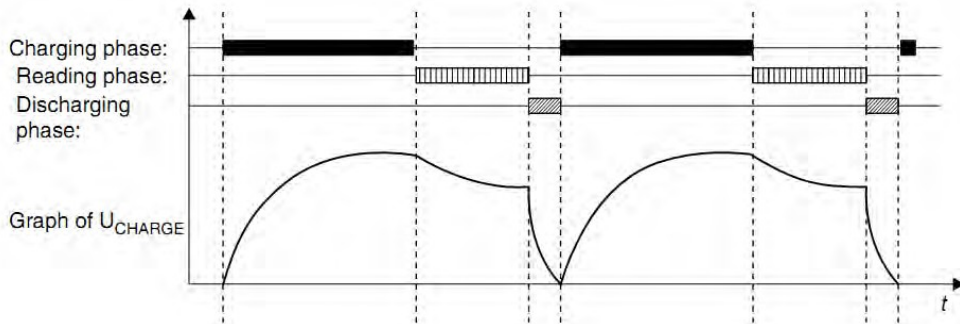


Рис. 8. Діаграма сигналів акумулюючого конденсатора [3]

На першому етапі зарядки нагромаджується заряд на акумулюючому конденсаторі. Знаючи напругу U_p і струм I_p у коливальному контурі, можна визначити необхідне значення ємності акумулюючого конденсатора:

$$C = \frac{Q}{U_p} = \frac{I_p \cdot T}{U_{\max} - U_{\min}}$$

Після зарядки активується електронна схема і розпочинається другий етап – передавання ідентифікаційних даних із транспондера. У реальних низькочастотних RFID системах, наприклад, в системі TIRIS корпорації Texas Instruments Inc. дані відгуку транспондера передаються впродовж 20 мс і містять 128 бітів (зокрема розряди контролю помилок). Під час роботи електронної схеми струм споживання поступово розряджає конденсатор. Після того, як всі дані було передано, активізується третій етап примусової розрядки конденсатора, що забезпечує сталі початкові умови на початку наступного циклу зарядки.

На рис. 9 наведено принципову схему блоку живлення пасивної RFID-мітки, яка побудована у середовищі програмного пакета PSpice. Застосовуючи пакет PSpice, можна провести оцінкове моделювання роботи всієї RFID-системи. Задля цього електромагнітний зв'язок між антенами зчитувача і транспондера подають у вигляді трансформатора TX1.

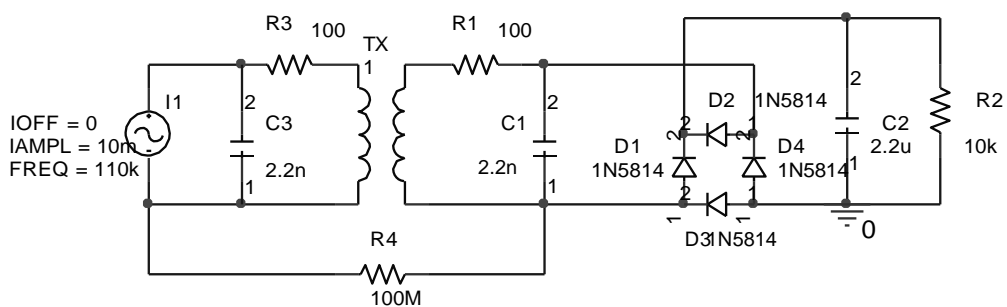


Рис. 9. Принципова схема блоку живлення транспондера системи RFID

На основі бібліотеки PSpice моделей діодів і конденсаторів створено список відповідних з'єднань [3]. Наприклад, фрагмент коду, що описує PSpice модель трансформатора, має вигляд:

```
.subckt SCHEMATIC1_TX1 1 2 3 4
K_TX1 L1_TX1 L2_TX1 0.5
L1_TX1 1 2 680uH
L2_TX1 3 4 680uH
```

```

.ends SCHEMATIC1_TX1 **** INCLUDING RFID-SCHEMATIC1.net ****
* source RFID
I_I1 N01028 N01052 DC 0Adc AC 1Aac
+SIN 0 10m 110k 0 0 0
C_C1 N00847 N00844 2.2n
R_R3 N01028 N006210 100
C_C2 0 N02000 2.2u
R_R4 N01052 N00847 100M
X_TX1 N006210 N01052 N006212 N00847 SCHEMATIC1_TX1
X_D3 0 N00847 D1N5814
C_C3 N01052 N01028 2.2n
X_D1 N00847 N02000 D1N5814
R_R1 N006212 N00844 100
X_D4 0 N00844 D1N5814
R_R2 0 N02000 10k
X_D2 N00844 N02000 D1N5814
.subckt SCHEMATIC1_TX1 1 2 3 4
K_TX1 L1_TX1 L2_TX1 0.5
L1_TX1 1 2 680uH
L2_TX1 3 4 680uH
.ends SCHEMATIC1_TX1
**** RESUMING rfid-schematic1-bias.sim.cir ****
.END

```

Щоб одержати точнішу модель RFID-системи потрібно створити модель антени транспондера у пакеті COMSOL Multiphysics та імпортувати до цього пакета список з'єднань PSpice.

Опис моделі антени у пакеті COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics є програмним середовищем, що дає змогу моделювати різні фізичні процеси, які можна подати у вигляді системи диференціальних рівнянь у часткових похідних [4]. Для моделювання виготовленої на друкованій платі антени транспондера застосовують метод скінченних елементів.

Послідовність створення моделі антени у пакеті COMSOL та імпорту моделі PSpice така [5]:

Створити схему файлу в редакторі за вибором.

Зберегти файл як rfid.cir у тому самому місці, що і модель-файл, створений раніше. Потім повернутися до вікна COMSOL Multiphysics.

Відкрити вікно із File> COMSOL пункт меню Script.

У командному рядку, перебуваючи в папці, де зберігаються файли моделі і схеми, ввести команду:

FEM = spiceimport ('rfid.cir').

Повернутися до вікна COMSOL Multiphysics і вибрати Import> FEM структури від меню Файл. Після появи типу FEM в діалоговому вікні натиснути кнопку ОК.

Висновок

Програмний пакет фізико-технічного моделювання COMSOL Multiphysics надає користувачам повний спектр інструментів для моделювання. Розробник може не лише розрахувати значення параметрів антени транспондера, але і виконати імітаційне моделювання роботи всієї системи RFID із урахуванням геометричних розмірів антени транспондера, впливу матеріалу друкованої плати, а також параметрів зовнішнього електромагнітного поля. Для цього потрібно імпортувати до середовища COMSOL параметри моделі PSPICE, представлених реальними елементами принципової електричної схеми блоку живлення транспондера із вбудованої бібліотеки.

1. Finkenzeller K.: *RFID Handbook*. John Wiley & Sons Ltd, 2003, 425 p. 2. *MicroID® 13.56 MHz Design Guide*, Microchip Technology Inc., 2003, 214 p. 3. Хайнеман Р. *PSPICE. Моделирование*

работы электронных схем: Пер. с нем. – М.: Изд-во ДМК Пресс, 2005. 336 с. 4. Фізико-технічне моделювання. Метод скінченних елементів / С. Д. Каїм. – Одеса: Негоціант, 2005.– 68 с. 5. COMSOL Multiphysics Modeling Guide, version 3.4, 2007, 474 p. 6. AC/DC Module – Model Library, ver. 3.4, COMSOL AB, 2007, 470 p. 7. Inductor in Amplifier Circuit // Solved with COMSOL Multiphysics 3.3.