

**ИЗСЛЕДВАНЕ И ПРЕПОДАВАНЕ НА ИНДУКТИВНО СВЪРЗАНИ
КРЪГОВЕ С ПОМОЩТА НА ПРОГРАМНИ СРЕДИ**

Велислава Райдовска, Величко Манев, Диляна Кашокова
Пловдивски университет „Паисий Хилендарски”, Физико-технологичен факултет

**RESEARCH AND TEACHING OF INDUCTIVELY
COUPLED CIRCUITS WITH MODELLING IN VIRTUAL
ENVIRONMENT**

Velislava Raydovska, Velichko Manev, Dilyana Kashokova
*UNIVERSITY OF PLOVDIV PAISII HILENDARSKI
FACULTY OF PHYSICS AND TECHNOLOGY*

Abstract

The paper considers to study and teaching the system of two inductively coupled RLC circuits in direction with the trend for innovative learning through simulations in different programming environments. The programme is developed to calculate the basic parameters of the oscillating circles and as a result is plotted curve of the dependency in the Matlab programming environment. The work of the same system is simulated in virtual environment.

The program which is presented in the paper may be used in the educational process in the "Electrical Engineering" or "Analog Devices" course, included in the curriculum of the specialty "Electricity technology" or "Computer and Communication Systems" for the Bachelor educational degree.

Keywords: *inductively coupled RLC circuits, frequency response.*

ВЪВЕДЕНИЕ

Използване на симулациите в практическото обучение по всички учебни технически дисциплини е основа за модернизиране на образователната система е съществен елемент от образователна политика. Използването на виртуални програмни среди в обучението и компютърното симулиране повишава интереса на обучаваните и качеството на придобитите инженерни знания. Моделирането на електронни схеми чрез различни програмни среди дава възможност да се изследват процесите в тях, да се експериментира тяхната работа без да се създават рискови ситуации за студентите и за реалните устройства. Провеждането на виртуални лабораторни упражнения позволяват на студентите да натрупат опит и добият увереност, преди да се реализират в практиката [1].

MatLab е диалогова програмна система специално създадена за научно-технически

и инженерни изчисления. MatLab е обектно ориентиран език за програмиране, в който основният обект е масив от данни - вектор, матрица, многомерен масив, масив от записи. По този начин системата предлага възможности с един оператор да се обработят едновременно всички елементи на масива. Това я прави подходяща за обработка на експериментални данни и за построяване на инженерна графика – двумерна и тримерна [2].

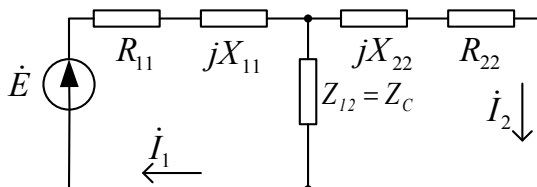
Виртуалната среда Multisim притежава удобен и разбираем интерфейс. В нея могат да се планират и изпълняват симулации на електронни схеми, да се проектират печатни платки и тяхното автоматично опроводяване. Тя позволява бързо проектиране и тестване на схеми, притежава инструментариум за обучение по схемотехника. Дава възможност за сравнение на реални и симулирани измервания [3].

Свързаните трептящи кръгове с индуктивна връзка са обект на изучаване и из-

следване в курса по електротехника или аналогови устройства. Чрез тях може да се подобрява честотния обхват на филтри. Трябва да се вземат под внимание и паразитния ефект на взаимодействието между кръговете. В статията се предлага освен теоретичното запознаване с материала и експериментални изследвания като междинно звено е да се включи и симулационно провеждане на упражнението. В разглежданото упражнението се моделира свързан кръг с индуктивна връзка и изследването на честотните му характеристики при различни фактори на връзката. Използват се програмните среди MatLab и Multisim на NI.

Основни зависимости при индуктивно свързани кръгове

Свързаните кръгове се наричат системи от два или повече трептящи кръгове, електромагнитните процеси в които си оказват взаимно влияние [4]. Фактически двата кръга винаги имат някакъв общ с импеданс Z_C , който се нарича елемент на връзката и от чиято големина зависи степента на свързаност на двата кръга.



Фиг. 1. Обобщена електрическа схема на два свързани кръга

Всяка система от два свързани кръга може да бъде представена с обобщената схема, показана на фиг. 1. При електрически и магнитно свързани кръгове импедансът на връзката е чисто реактивен.

$$Z_C = Z_{12} = jX_{12} \quad (1)$$

Основни величини, характеризиращи свързаните кръгове са: коефициент на връзка, фактор на връзката, обобщени разстройки, еквивалентни импеданси на всеки от кръговете, честотни характеристики [4], [5] и [6].

Коефициентът на връзката при индуктивно и капацитивно свързани кръгове се дава със зависимостите:

$$k = \frac{X_{12}}{\sqrt{X_{10}X_{20}}}, \quad (2)$$

където X_{10} и X_{20} са обходните реактивни съпротивления на първия и втория кръг, имащи еднакъв характер с импеданса на връзката.

Факторът на връзката A се изчислява по зависимостта

$$A = \frac{X_{12}}{\sqrt{R_1R_2}} \quad (3)$$

При $A < 1$ връзката е подкритична, при $A = 1$ връзката се определя като критична, а при $A > 1$ – надкритична.

Обобщените разстройки на двата кръга се дават със зависимостите:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \frac{X_1}{R_1} \approx \frac{2\Delta f_1}{f_{rez1}} Q_1, \\ \xi_2 &= \frac{X_2}{R_2} \approx \frac{2\Delta f_2}{f_{rez2}} Q_2, \end{aligned} \quad (4)$$

където Δf_1 и Δf_2 са абсолютните разстройки като $\Delta f_1 = f_1 - f_{1rez}$, $\Delta f_2 = f_2 - f_{2rez}$, а Q_1 и Q_2 са качествените фактори на двата кръга.

Реактивните съпротивления X_1 и X_2 включват освен X_{11} и X_{22} и съответните, отнасящи се към всеки от кръговете, съставни на импеданса на връзката X_{12} . Приблизителните равенства (4) са достатъчно точни за честоти близки до резонансите на двата кръга.

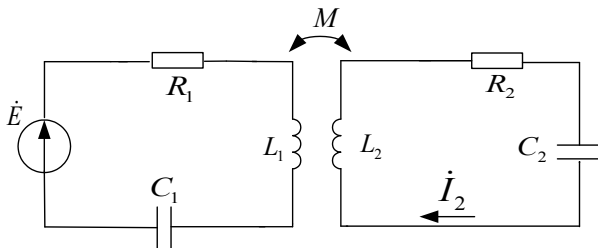
Характеристиката $I_2 = I_2(f)$ се изчислява по зависимостта

$$I_2 = \frac{A.E}{\sqrt{R_1R_2} \sqrt{(A^2 + 1 - \xi_1\xi_2)^2 + (\xi_1 + \xi_2)^2}} \quad (5)$$

Изследване на два индуктивно свързани кръгове във виртуални среди.

Да се изследва система от два индуктивно свързани кръга (фигура 2), който има следните параметри: $L_1 = L_2 = 200 \mu\text{H}$; $C_1 = C_2 = 500 \text{pF}$; $M = 10 \mu\text{H}$. И двата кръга имат една и съща резонансна честота $f_{01} = f_{02} = 497 \text{kHz}$. Стойностите на резисторите $R_1 = R_2$ са съответно 10Ω , 32Ω или 100Ω .

Необходимо е да се изчислят факторът на връзката, Q-факторът, да се изчертае характеристиката $I_2=I_2(f)$. Да се симулира работата на кръга в програмна среда и да се изчертае характеристиката $I_2=I_2(f)$ за виртуално снетите данни. Да се направи анализ на получените резултати.



Фиг. 2. Верига от два индуктивно свързани кръга

За да се изследват двата кръга в програмната среда MatLab е разработена програмата *couplingcircuits.m*. Част от сорс кода, свързан с изследването на кръгове с индуктивна връзка, е:

```
disp('програма за изчертаване на честотна характеристика на ')
disp('система от два свързани кръга с индуктивна връзка')
disp('*****')
f0=input('Резонансната честота, в Hz: f0=');
E=input('Ефективна стойност на захранищо напрежение, във V: E=');
R1=input('Съпротивление на първи кръг в Омове R1=');
R2=input('Съпротивление на втори кръг в Омове R2=');
L11=input('Индуктивност на първи кръг в Хенри L11=');
L22=input('Индуктивност на втори кръг в Хенри L22=');
C2=input('капацитет на втори кръг във Фаради C2=');
M=input('Взаимна индуктивност в Хенри M=');
L10=L11+M;
L20=L22+M;
R=sqrt(R1*R2);
A=(2*pi*f0*M)/R;
disp(['Факторът на връзката A=',num2str(A)])
Q1=(2*pi*f0*L11)/R1;
disp(['Q-Факторът Q1=',num2str(Q1)])
```

```
Q2=(2*pi*f0*L22)/R2;
disp(['Q-Факторът Q2=',num2str(Q2)])
f=input('задайте интервал за изменение на честота във формат fmin:стъпка на изменение:fmax f=');
deltaf=f-f0;
raztroika11=(2.*deltaf).*Q1;
raztroika12=raztroika11./f0;
raztroika21=(2.*deltaf).*Q2;
raztroika22=raztroika21./f0;
raztroikat=raztroika12.*raztroika22;
Y11=(A^2)+1-raztroikat;
Y21=Y11.^2;
Y31=raztroika12+raztroika22;
Y311=Y31.^2;
Y41=sqrt(Y21+Y311);
Y51=A*E/R;
I2=Y51./Y41;
% Изчертаване на графиката
plot(f,I2)
title('Зависимост на тока I_{2} от честотата')
xlabel('честота f, Hz');
grid on
ylabel('I_{2},A')
```

Разработената програма е универсална. При стартирането ѝ се появява прозорец, от който трябва да се избере вида на връзката. След това се вкарват данните от заданието. Програмата изчислява търсените величини, изписва ги в работното поле и изчертава графиката на зависимостта $I_2=I_2(f)$.

При стартирането на екрана се получава следната информация:

```
програма за изчертаване на честотна характеристика на
система от два свързани кръга с индуктивна връзка
*****
```

Следват команди за задаване на параметрите на веригата. Програмата се стартира три пъти за всяка от зададените стойности на резисторите $R_1=R_2$: 10Ω, 32 Ω и 100Ω. Стойностите на резисторите са подбрани, за да се наблюдават трите вида връзки – надкритична, критична и подкритична.

A. Резултати при надкритична връзка:
Резонансната честота, в Hz: $f_0=497000$
Ефективна стойност на захранищо напрежение, във V: $E=1$

Съпротивление на първи кръг в Омове
 $R1=10$

Съпротивление на втори кръг в Омове
 $R2=10$

Индуктивност на първи кръг в Хенри
 $L11=200 \cdot 10^{-6}$

Индуктивност на втори кръг в Хенри
 $L22=200 \cdot 10^{-6}$

капацитет на втори кръг във Фаради
 $C2=500 \cdot 10^{-12}$

Взаимна индуктивност в Хенри
 $M=10 \cdot 10^{-6}$

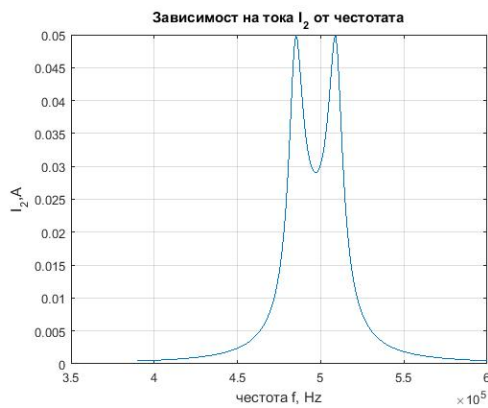
Факторът на връзката $A=3.1227$

Q -Факторът $Q1=62.4549$

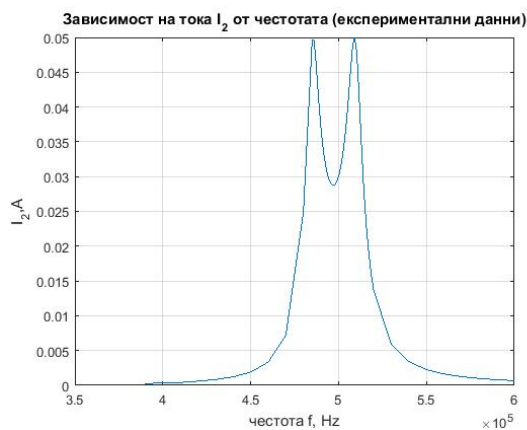
Q -Факторът $Q2=62.4549$

задайте интервал за изменение на
честота във формат $f_{min}:стъпка$ на
изменение: $f_{max} f=390000:1000:600000$

Графичният резултат е показан на фиг. 3а.



а.)



б.)

Фиг. 3. Зависимост $I_2=I_2(f)$ при надкритична връзка. а.) в програмна среда MatLab; б.) при симулация в Multisim

Б. Резултати при критична връзка:
Резонансната честота, в Hz: $f0=497000$

Ефективна стойност на захранващо
напрежение, във V: $E=1$

Съпротивление на първи кръг в Омове
 $R1=32$

Съпротивление на втори кръг в Омове
 $R2=32$

Индуктивност на първи кръг в Хенри
 $L11=200 \cdot 10^{-6}$

Индуктивност на втори кръг в Хенри
 $L22=200 \cdot 10^{-6}$

капацитет на втори кръг във Фаради
 $C2=500 \cdot 10^{-12}$

Взаимна индуктивност в Хенри
 $M=10 \cdot 10^{-6}$

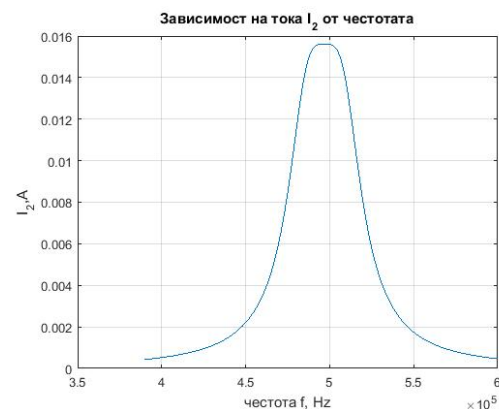
Факторът на връзката $A=0.97586$

Q -Факторът $Q1=19.5171$

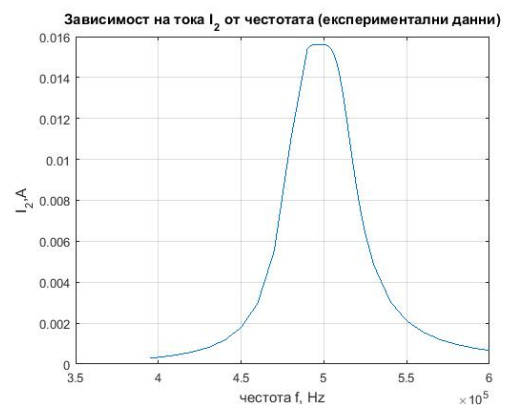
Q -Факторът $Q2=19.5171$

задайте интервал за изменение на
честота във формат $f_{min}:стъпка$ на
изменение: $f_{max} f=390000:1000:600000$

Графичният резултат е показан на фиг. 4а.



а.)



б.)

Фиг. 4. Зависимост $I_2=I_2(f)$ при критична връзка. а.) в програмна среда MatLab; б.) при симулация в Multisim

В. Резултати при подкритична връзка:
 Резонансната честота, в Hz: $f_0=497000$
 Ефективна стойност на захранващо
 напрежение, във V: $E=1$

Съпротивление на първи кръг в Омове
 $R1=100$

Съпротивление на втори кръг в Омове
 $R2=100$

Индуктивност на първи кръг в Хенри
 $L11=200 \cdot 10^{-6}$

Индуктивност на втори кръг в Хенри
 $L22=200 \cdot 10^{-6}$

капацитет на втори кръг във Фаради
 $C2=500 \cdot 10^{-12}$

Взаимна индуктивност в Хенри
 $M=10 \cdot 10^{-6}$

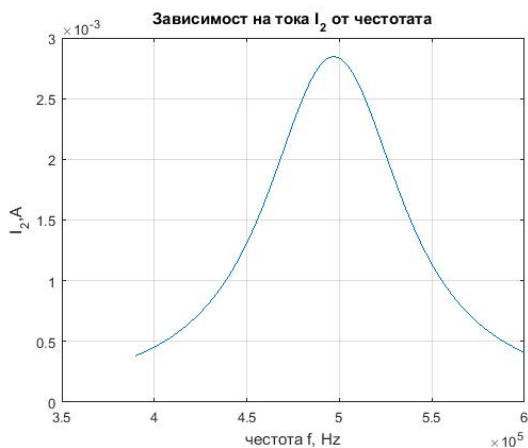
Факторът на връзката $A=0.31227$

Q-Факторът $Q1=6.2455$

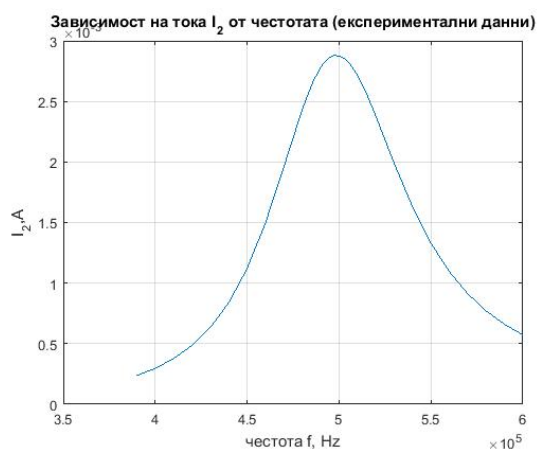
Q-Факторът $Q2=6.2455$

задайте интервал за изменение на
 честота във формат fmin:на изменение:fmax
 $f=390000:1000:600000$

Графичният резултат е показан на фиг. 5а.



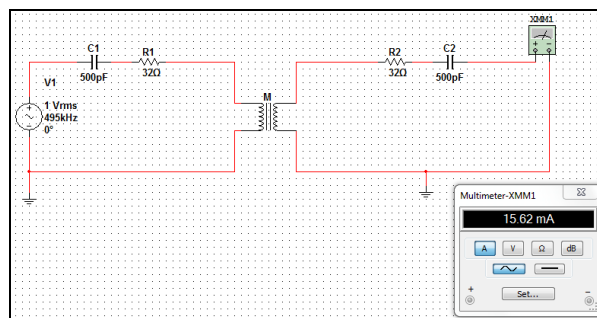
а.)



б.)

Фиг. 5. Зависимост $I_2=I_2(f)$ при критична връзка. а.) в програмна среда MatLab; б.) при симулация в Multisim

След това студентите реализират изследваната схема в програмната среда Multisim на NI както е показано на фигура 6. Провеждат се изследвания за честотния диапазон от 395 до 595 kHz. По получените данни се построяват характеристиките за трите разглеждани стойности на съпротивленията (фиг. 3б, 4б и 5б).



Фиг. 6. Симулация на работата на разглежданата верига в Multisim

Анализът на получените по изчислителен и по опитен път графики показва, че те са с еднакъв характер на изменение. При увеличаване на степента на връзката резонансната крива е едногърба, като стойността на максимума расте, а кривата се разширява. Качествено ново поведение се наблюдава при повишаване на степента на връзката над критичната. Кривата вече е с два максимума, отговарящи за две нови резонансни честоти. При резонансната честота се наблюдава минимум.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Съобразно с тенденциите за иновативното обучение чрез симулации в различни програмни среди е разработено упражнение за изследване на система от два трептящи кръга с индуктивна връзка. В програмната среда MatLab е разработена програма за изчисляване на основните величини на трептящите кръгове и като резултат се построява кривата на зависимостта. Работата на същата система се симулира във програмната среда Multisim на NI. Сравнителният анализ показва съпадение на изчислените и полу-

чените данни, при изследване на схемата във виртуална среда.

Симулациите позволяват обучение чрез правене, знанията и уменията се придобиват по активен начин. Разработената програма се прилага при обучението на студенти от инженерни специалности и би могла да послужи като основа за провеждането на проектно-базирано обучение по дисциплината „Електротехника” или „Аналогови устройства”.

Acknowledgement

The authors would like to acknowledge the support of the "Research & Development" division of UNIVERSITY OF PLOVDIV PAISII HILENDARSKI in the project: СИ17-ТК-004/16.05.2017.

REFERENCE

- [1] Raydovska Velislava, D. Shehova, Sl. Lyubomirov, Research of the coupled tank circuits in programming environments, 15th International Scientific Conference “Renewable Energy & Innovative Technologies”, Conference Proceedings, Smolyan – Bulgaria, Volume 1, 2016, pp. 184-187.
- [2] Лазарев Юрий, Начала программирования в среде MatLab, Киев, НТУУ "КПИ", 2003.
- [3] Shehova Daniela, Software Environments Applicable in Teaching Analog and Mixed Signals Circuits Design, ANNUAL JOURNAL OF ELECTRONICS, 2015, pp. 88-91.
- [4] Kyurkchieva R., Komunikacionni verigi, Rakovodstvo za uprajnenia i kursov projekt, TU - Varna, 2001.
- [5] Farhi C, S. Papazov, Teoretichna elektrotehnika, Part I, Ed. Technika, Sofia, 1990.
- [6] Genov Lyudmil, Teoretichni osnovi na elektrotehnikata, Ed. Technika, Sofia, 1991.