

А.А. Штин, А.А. Шарафуллина
(г. Ижевск, Ижевский государственный технический университет
им. М.Т. Калашникова)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНДУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ MULTISIM

Рассмотрены особенности моделирования в Multisim таких элементов электрических цепей, как реальные и идеальные катушки индуктивности.

Features of modeling in Multisim of such elements of electric circuits as real and ideal coils of inductance are considered.

Ключевые слова: моделирование, индуктивность, добротность, резонансная частота, активное сопротивление.

Keywords: simulation, inductance, quality factor, resonance frequency, active resistance.

Компьютерное моделирование в настоящее время широко используется в самых различных областях науки и техники. В частности, в учебном процессе оно позволяет сократить затраты на оборудование, необходимое для проведения лабораторных работ.

Multisim используется на кафедре «Электротехника» ИжГТУ [1] и является одной из наиболее востребованных программных сред для моделирования электронных и электротехнических устройств. В то же время процесс моделирования индуктивных элементов слабо освещен в литературе, в том числе и в руководстве разработчика [2].

Цель работы – выяснение адекватности моделей реальной и идеальной индуктивностей.

Катушка индуктивности представлена в *Multisim* тремя моделями: *INDUCTOR*, *INDUCTOR_ADVANCED* и *INDUCTOR_RATED*.

INDUCTOR – это модель идеальной индуктивности, не имеющей паразитных параметров. Единственный параметр, задаваемый пользователем, – индуктивность (*Inductance*). В некоторых случаях может быть задан начальный ток (*Initial conditions*).

Данный компонент иллюстрируется схемой на рис. 1, на которой идеальная индуктивность LI подключена к идеальному источнику VI .

Активная мощность по показаниям ваттметра на рис.1 и коэффициент мощности $\cos\varphi$ (*Power factor*) равны нулю.

Заметим, что в рассмотренной схеме значение начального тока выбрано равным -1 А. В противном случае осциллограмма тока будет иметь постоянную составляющую, что не совсем реально.

В схемах, моделирующих реальные устройства, всегда присутствуют активные сопротивления и этот эффект не проявляется. Таким образом, модель идеальной индуктивности может использоваться без каких-либо оговорок.

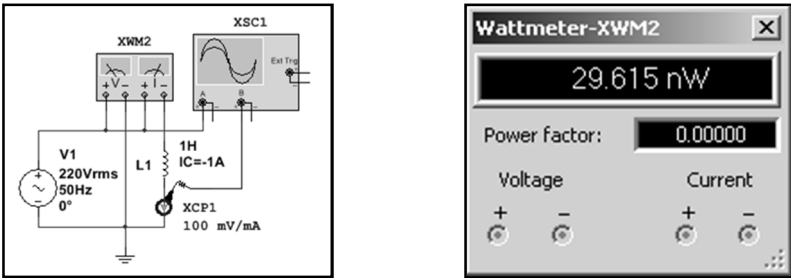


Рис. 1. Схема включения идеальной индуктивности:
XWM2 – ваттметр, XSC1 – осциллограф, XCP1 – датчик тока

INDUCTOR_ADVANCED – это модель реальной индуктивности, которая характеризуется следующими параметрами:

- номинальная индуктивность - *Nominal inductance (Lo)*;
- собственная частота резонанса - *Inductor self resonant frequency (fo)*;
- последовательное сопротивление - *Inductor series resistance (Rdc)*;
- добротность - *Inductor quality factor (Q)*;
- номинальный ток - *Inductor rated current (Idc)*.

Эквивалентная схема, соответствующая модели данного компонента, и собственно модель показаны на рис. 2.

Параметры Cp и Rp на рис. 2 в соответствии с используемой в *Multisim SPICE* - моделью рассчитываются следующим образом:

$$Cp = \frac{1}{2\pi^2 fo^2 Lo}, \quad Rp = Q \cdot 2\pi fo Lo. \quad (1)$$

Параметры, входящие в выражения (1), были приведены выше.

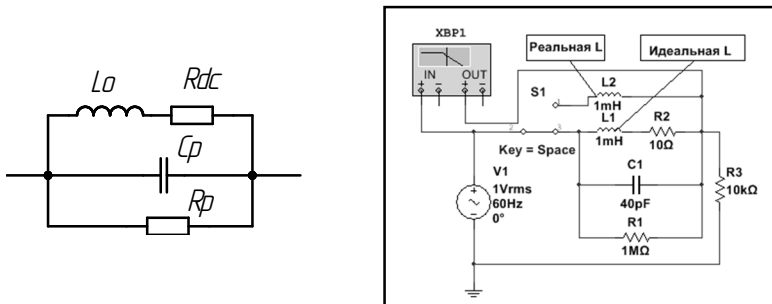


Рис. 2. Эквивалентная схема реальной индуктивности

Проверка модели реальной индуктивности проводилась путем включения ее в схему режекторного фильтра, как показано на рис. 2.

Были выбраны следующие значения: $L_o = 1$ мГн, $Q = 200$, $f_o = 0,8$ МГц, $R_{dc} = 10$ Ом. Параметры эквивалентной схемы выбирались в соответствии с формулами (1): $C_p \approx 40$ пФ, $R_p = 1$ Мом. К выходу схемы подключен виртуальный прибор для измерения амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ). В терминах *Multisim* – это *Bode Plotter*.

Показания прибора показаны на рис. 3 и практически одинаковы для обоих положений переключателя *S1*. Видно, что резонансная частота соответствует заданной, т.е. 799,136 кГц (практически 0,8 МГц).

На рис. 4 показаны АЧХ и ФЧХ той же схемы, но для значения $Q = 5$, т.е. $R_p = R_l = 25$ кОм. Они практически одинаковы для обоих положений *S1*.

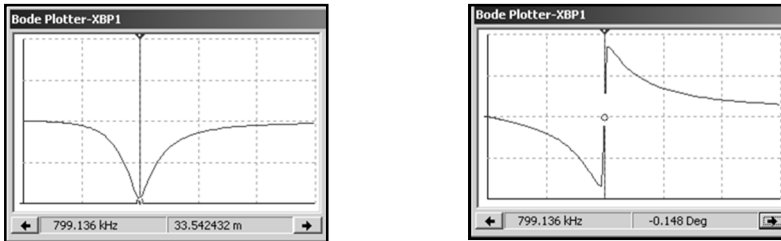


Рис. 3. АЧХ и ФЧХ цепей на рис. 4 для $Q = 200$

Видно, что резонансная частота не изменилась, а резонансный режим путем уменьшения добротности стал менее выраженным.

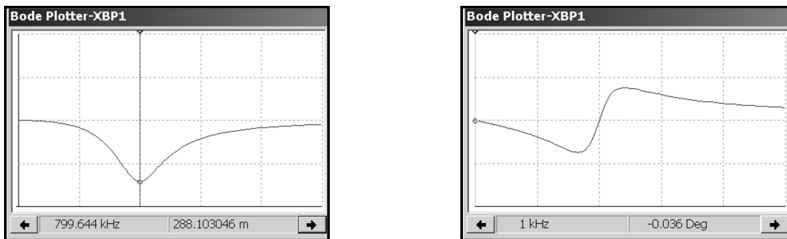


Рис. 4. АЧХ и ФЧХ цепей на рис. 4 для $Q = 5$

Следует заметить, что данная модель имеет недостаток, так как добротность Q задается в виде постоянной величины. На практике добротность является функцией частоты [3].

INDUCTOR_RATED - упрощенная модель индуктивности, имеющая следующие параметры:

- фактор задержки анимации (*Animation shutdown factor*);
- индуктивность (*Inductance*);
- активное сопротивление (*Coil resistance*);
- допустимый ток (*Current rated*);
- начальные условия (*Initial conditions*).

Эта модель позволяет отобразить аварийный режим. Сущность данной модели состоит в том, что превышение допустимого тока (в данном случае 0,3 А) приводит к выходу индуктивного элемента L1 из строя. Это проявляется в изменении внешнего вида элемента L1 на схеме (рис. 5).

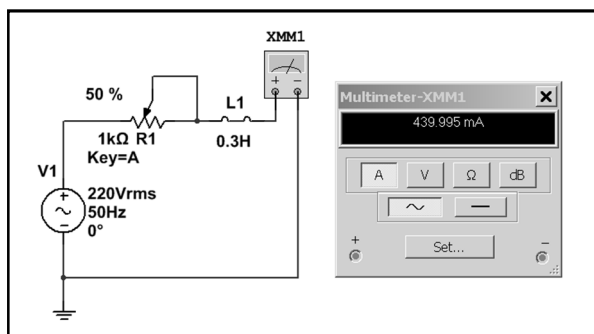


Рис. 5. Аварийный режим работы индуктивности

Кроме того, изменяются его электрические параметры. В частности, индуктивность и активное сопротивление становятся равными нулю. Заметим, что обычно отказ индуктивных элементов проявляется в виде обрыва проводника либо в виде межвиткового замыкания.

Фактор задержки анимации определяет временной интервал, с момента наступления аварийного режима до момента изменения внешнего вида индуктивного элемента и режима работы схемы.

Выводы. Идеальная и реальная индуктивности моделируются в Multisim вполне адекватно. Однако в модели реальной индуктивности не учитывается зависимость добротности от частоты, что может влиять на процесс моделирования радиотехнических схем.

Кроме того, превышение допустимого тока может привести к разрыву цепи с индуктивностью. Это явление также не учитывается в модели индуктивности **INDUCTOR_RATED**.

Наконец, все три рассмотренные модели индуктивных элементов на схеме Multisim отображаются совершенно идентично, что требует дополнительных разъяснений в учебно-методических материалах.

Список литературы

1. Штин, А.А. Электротехнические дисциплины в среде моделирования *Multisim*: лабораторный практикум: учеб. пособие для вузов. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2016. – 220 с.
2. *Multisim*. Руководство пользователя. *National Instruments Corporation*: 2007. – 491 с.
3. Кушнир, Ф.В. Электрорадиоизмерения: учебное пособие для вузов/ Ф.В. Кушнир, В.Г. Савенко. – Л.: "Энергия", 1975. – 368 с.

Материал поступил в редколлегию 11.10.18.