

Семинар №5 по курсу «Электромагнитная совместимость РЭС».

Спектр радиопомех, отдаваемых в сеть тиристорным регулятором мощности переменного тока.

к.т.н., доцент кафедры ЭИУ1-КФ Кузнецов В.В.

30 октября 2015 г.

1 Введение

Целью семинара является изучение спектра помех в тиристорном регуляторе переменного тока и моделирование спектра помех с использованием программы Qucs.

2 Тиристорный регулятор мощности переменного тока как источник помех

2.1 Принцип действия тиристорного регулятора мощности переменного тока

Рассмотрим тиристорный регулятор с фазовым управлением. Его схема показана на рис.1.

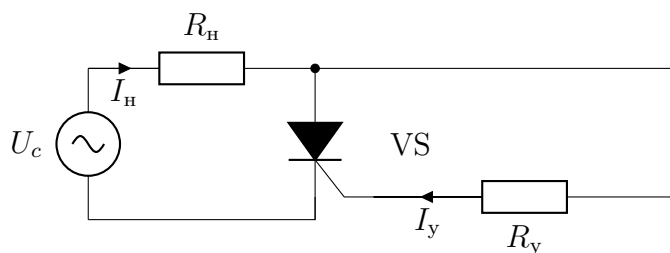


Рис. 1. Тиристорный регулятор с фазовым управлением

Тиристор $VS1$ включен в разрыв нагрузки R_n источника переменного тока U_c . В качестве нагрузки может использоваться коллекторный электродвигатель, нагревательный элемент, лампа накаливания и т.п. В течение каждого полупериода сетевого напряжения тиристор открывается как только ток его управляющего электрода достигнет порогового тока открывания тиристора. Ток нагрузки I_n имеет форму, показанную на рис.2.

Напряжение источника переменного тока изменяется по синусоидальному закону и определяется амплитудным напряжением U_m и частотой f :

$$U_c = U_m \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

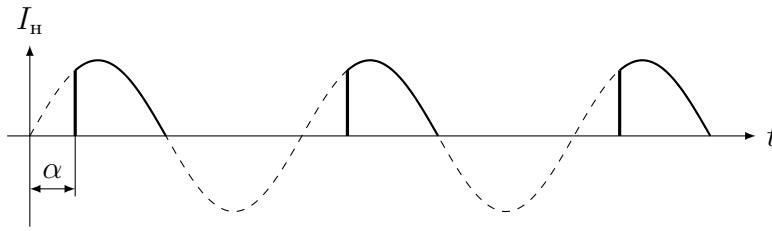


Рис. 2. Осциллограмма тока нагрузки I_n

Момент открывания тиристора соответствует углу управления α . В обратном направлении тиристор не проводит. Если $\alpha = 0$, то мощность в нагрузке максимальна, если $\alpha = 180^\circ$, то мощность равна нулю, тиристор закрыт. Меняя сопротивление резистора R_y можно изменять угол управления в пределах от 0 до 90° (половинная мощность). Применяя электронные схемы фазового управления можно изменять угол управления в пределах от 0 до 180° .

В момент включения тиристора ток нагрузки скачком возрастает до некоторого значения I_0 , определяемого как:

$$I_0 = \frac{U_m}{R_n} \sin \alpha \quad (2)$$

Этот скачок тока создаёт значительные радио помехи, отдаваемые в питающую сеть и в нагрузку, превышающие установленные нормы более чем на 50 дБ в широкой полосе частот.

2.2 Анализ спектра помех тиристорного регулятора мощности переменного тока

Спектр помех тиристорного регулятора определяется с использованием преобразования Фурье. Тиристор заменяется идеальным электронным ключом, на котором до его замыкания имеется некоторая ЭДС E_t . Спектр помех $S(j\omega)$ определяется выражением:

$$S(j\omega) = \frac{E_t}{j\omega} (\sin \alpha + \frac{\Omega}{j\omega} \cos \alpha) \quad (3)$$

Где Ω — угловая частота сети питания:

$$\Omega = 2\pi f_c \quad (4)$$

Модуль спектральной плотности помех равен:

$$|S(j\omega)| = \frac{E_t}{\omega} \sqrt{\sin^2 \alpha + \left(\frac{\Omega}{\omega}\right)^2 \cos^2 \alpha} \quad (5)$$

Максимум модуля спектральной плотности достигается при $\alpha = 90^\circ$ и для некоторой частоты f из диапазона измерения он равен:

$$|S(j\omega)| = \frac{E_t}{2\pi f} \quad (6)$$

3 Моделирование спектра помех в тиристорном регуляторе

3.1 Тиристорный регулятор в Qucs

Промоделируем тиристорный регулятор напряжения переменного тока 220 В, 50 Гц в программе Qucs. Его схема показана на рис.3.

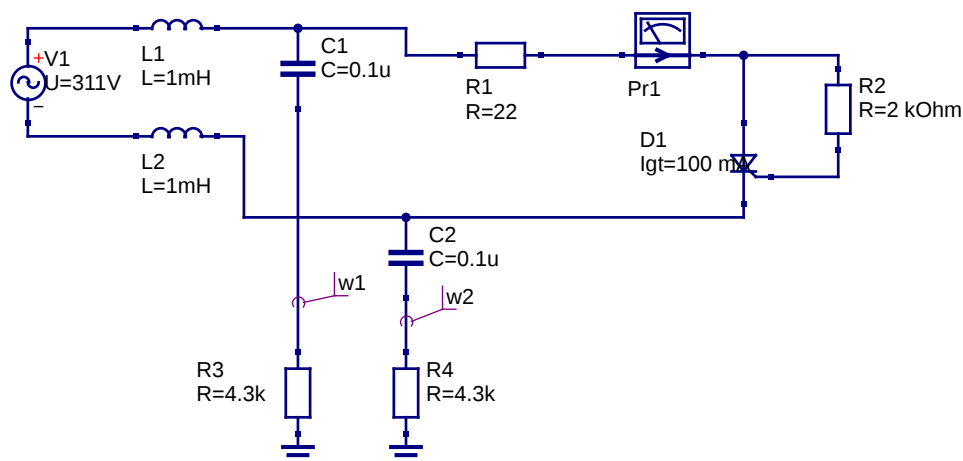


Рис. 3. Схема тиристорного регулятора в Qucs

Пороговый ток включения тиристора (параметр I_{gt}) установлен равным 10 мА, напряжение открывания — 400 В (см.рис.4). Виртуальный амперметр Pr1 служит для наблюдения за формой тока нагрузки (параметр Pr1.It).

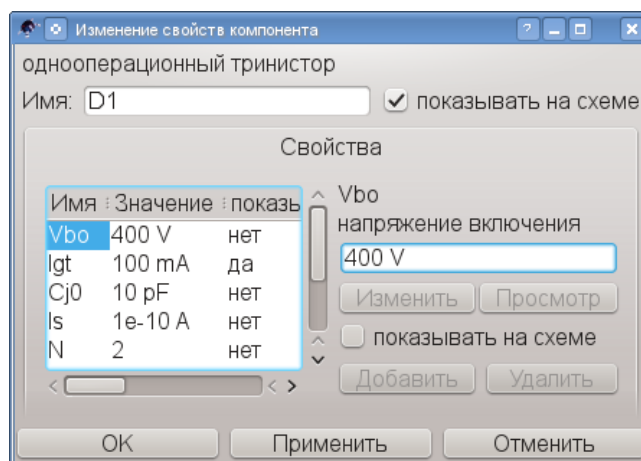


Рис. 4. Параметры тиристора на схеме рис.3

Угол открывания тиристора устанавливается резистором R2. Для измерения напряжения помех используется V-образный эквивалент сети (компоненты L1L2C1C2R3R4). Напряжение помех снимается с узла w1 или w2.

Чтобы вычислить спектр помех сначала производит моделирование переходного процесса. Нужно промоделировать как минимум один период сетевого напряжения ($1/50$ Гц = 20 мс). Затем вычисляем быстрое преобразование Фурье (БПФ) с нормировкой по времени

и по амплитуде при помощи функции `Time2Freq()`. Её результатом будет спектр напряжения с некоторым уровнем U .

Максимальная частота F_{max} , которую можно получить в спектре связана с длительностью моделирования τ , количеством точек расчёта и вычисляется на основе свойств дискретного преобразования Фурье:

$$F_{max} = \frac{N}{2\tau} \quad (7)$$

В нашем случае $\tau = 20 \text{ мс} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ и $N = 10000$ поэтому:

$$F_{max} = \frac{10000}{2 \cdot 20 \text{ мс}} = 250 \text{ кГц}$$

Следовательно, при помощи данного моделирования можно смоделировать спектр помех только до частоты 250 кГц. Чтобы смоделировать более высокие частоты, нужно увеличивать количество точек при расчёте переходного процесса.

Чтобы перевести выразить спектр в дБмкВ, то есть в децибелах относительно опорного напряжения $U_0 = 1 \text{ мВ}$, используем следующее выражение:

$$U(\text{дБмкВ}) = 20 \lg \frac{U}{U_0} \quad (8)$$

В результате моделирования получаем следующую картину распределения спектра помех в дБмкВ по частотной оси (см. рис.5).

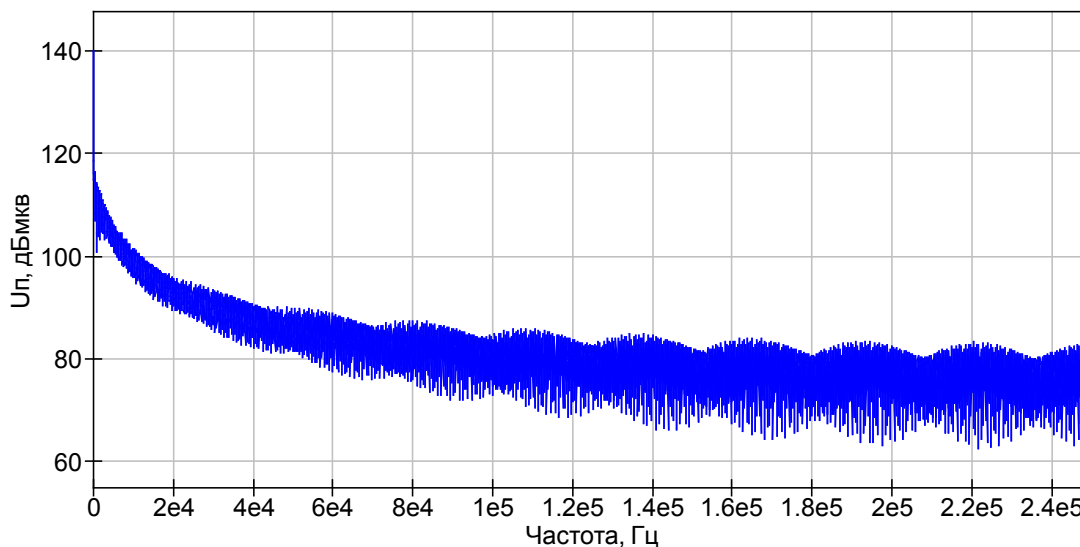


Рис. 5. Спектр помех тиристорного регулятора полученный в результате моделирования

Из рисунка видим, что на частоте 250 кГц уровень помех достигает 80 дБмкВ, и снижается с ростом частоты. Для борьбы с данными помехами следует исключить открывание тиристора при ненулевом напряжении на нагрузке. Для этого применяется метод ШИМ в сочетании с устройством контроля открывания тиристора при пересечении сетевым напряжением нулевого уровня (zero-cross) или метод распределённых сетевых периодов (РСП), при котором тиристор также открывается только при нулевом напряжении.

3.2 Задание для самостоятельной работы

1. Собрать в Qucs схему на рис.3
2. Смоделировать переходный процесс в схеме. Длительность моделирования 20 мс, количество точек расчёта — 10000
3. Рассчитать спектр напряжения помех, используя функцию `Time2Freq()`. Описание функции приведено во встроенной справочной системе (запускается по F1). Напряжение помех снимается с узла `w1`.
4. Рассчитать напряжение помех в дБмкВ, используя формулу (8) и функцию `dB()`.
5. В отчёт включить спектр помех и осциллограммы тока нагрузки. Выполнить подписи по осям на русском языке.

4 Заключение

В результате выполнения семинара студенты ознакомились с принципом действия фазового тиристорного регулятора мощности переменного тока