

# Семинар №1 по курсу «Электромагнитная совместимость РЭС».

## Переходные процессы в индуктивной нагрузке как источник помех и способы борьбы с ними.

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

20 августа 2014 г.

### 1 Введение

Целью семинара является изучение способов устранения импульсных перенапряжений, возникающих при коммутации индуктивной нагрузки в цепи постоянного тока. В ходе семинара необходимо промоделировать переходный процесс при коммутации индуктивной нагрузки и изучить способы подавления перенапряжений при переходном процессе.

### 2 Анализ переходного процесса в индуктивной нагрузке.

Индуктивной нагрузкой являются разнообразные электротехнические устройства, содержащие катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником или без сердечника. К ним относятся: трансформаторы, электромагнитные реле, электродвигатели, соленоидальные клапаны и т.п. Эти устройства широко используются в источниках питания и промышленной автоматике.

Катушку индуктивности можно представить в виде параллельного колебательного контура (рис. 1). Индуктивная нагрузка всегда имеет паразитную межвитковую ёмкость, которая определяет характер переходного процесса в ней.

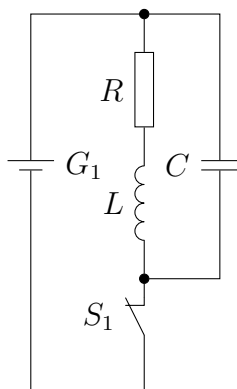


Рис. 1. Эквивалентная схема индуктивной нагрузки

При размыкании ключа  $S_1$  в параллельном колебательном контуре возникают затухающие колебания. При этом между контактами ключа возникают значительные импульсные перенапряжения, амплитуда которых достигает сотен вольт.

Частота затухающих колебаний соответствует резонансной частоте колебательного контура. Амплитуда колебаний определяется исходя из следующего выражения:

$$u(t) = U_0 \exp\left(-\frac{R}{2L}\right) \sin\left(\frac{1}{\sqrt{LC}}\right) \quad (1)$$

Где  $U_0$  определяется из начальных условий.

Эти перенапряжения приводят к образованию дуги в механических коммутаторах и пробое твердотельных коммутаторов. Дуга создает электромагнитные помехи.

Чтобы подавить данные помехи уменьшить амплитуду затухающих колебаний. Для этого нужно внести в колебательный контур дополнительное затухание (демпфирование), то есть снизить добротность контура и приблизить его к индуктивной нагрузке. При этом подавляется искрение и увеличивается срок службы контактов.

Пример переходного процесса в индуктивной нагрузке (схема рис.2) показан на рис.3. Параметры индуктивной нагрузки являются типичными для катушек электромагнитных реле, контакторов, пневмоклапанов и трансформаторов. График переходного процесса получен при помощи программы для схемотехнического моделирования Qucs.

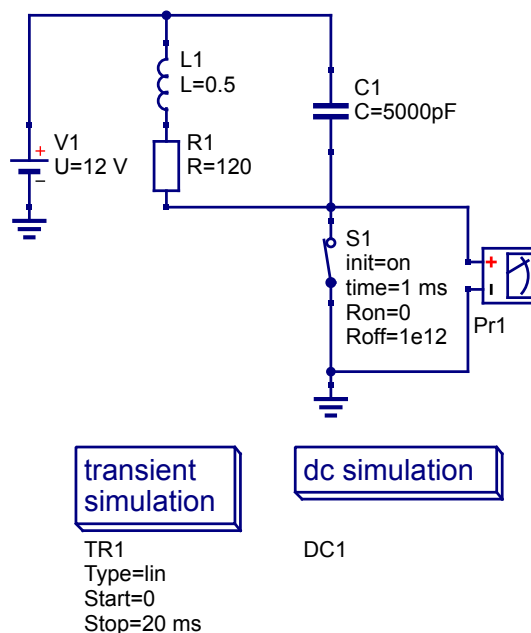


Рис. 2. Эквивалентная схема цепи коммутации индуктивной нагрузки.

Видно, что амплитуда импульсных перенапряжений на контактах  $S_1$  достигает 1000 В. В реальной схеме это может привести к выгоранию механических контактов или пробое полупроводниковых ключей.

**Задание:** Промоделировать схему на рис.2 и получить осциллограмму переходного процесса. Исследовать форму напряжения между контактами ключа  $S_1$  при помощи виртуального вольтметра  $Pr1$ . Сделать вывод об амплитуде перенапряжений.

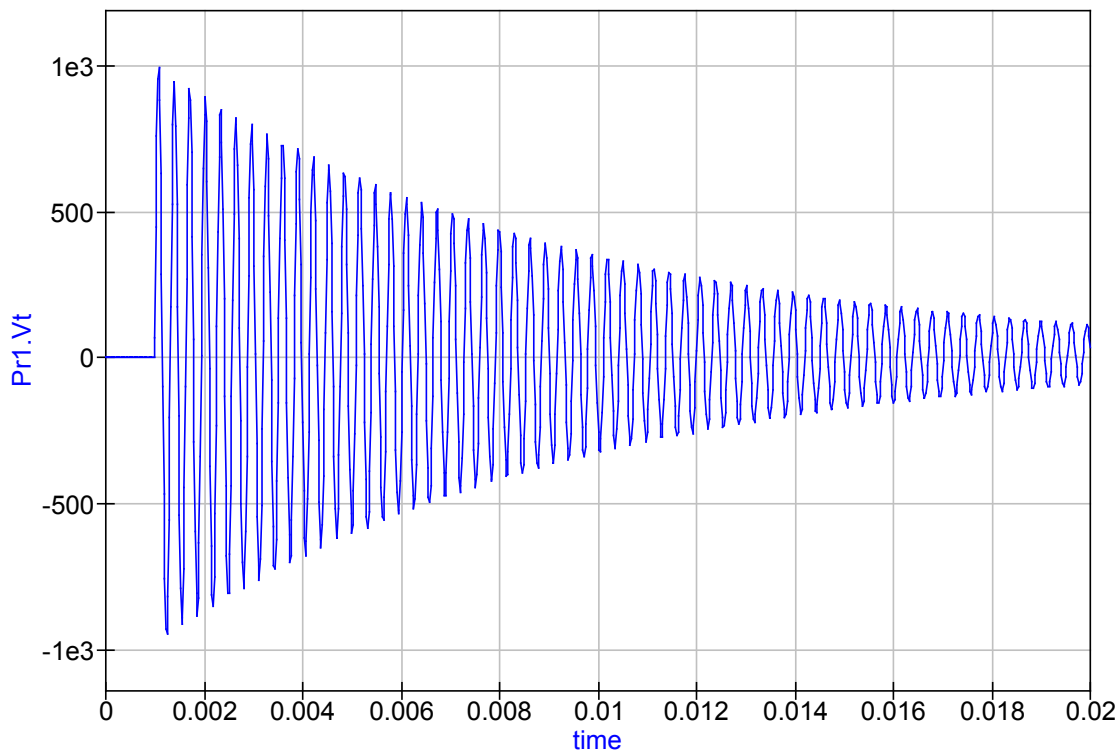


Рис. 3. Переходный процесс в цепи индуктивной нагрузки.

### 3 Способы подавления перенапряжений на индуктивной нагрузке

#### 3.1 Краткое рассмотрение

Существует три основных способа борьбы с перенапряжениями:

1. Включение параллельно контуру RC-цепочки. При этом образуется низкодобротный колебательный контур.
2. Включение параллельной индуктивной нагрузке полупроводникового диода в обратной полярности. Первый выброс напряжения на индуктивной нагрузке имеет отрицательную полярность. Диод открывается и шунтирует контур своим низким активным сопротивлением и поглощает энергию колебаний. Способ подходит только при коммутации индуктивной нагрузки в цепях постоянного тока.
3. Включение параллельно индуктивной нагрузке элемента с нелинейным сопротивлением (варистора). При появлении выброса напряжения амплитудой, превышающей пороговое напряжение варистора, варистор открывается и шунтирует своим активным сопротивлением колебательный контур.

#### 3.2 RC-цепочка

Простейшим способом подавления перенапряжений в индуктивной нагрузке является включение параллельной ей демпфирующей RC-цепочки. При надлежащем выборе её параметров добротность эквивалентного колебательного контура снижается, в контур

вносится затухание, энергия выброса напряжения поглощается параллельным активным сопротивлением и амплитуда перенапряжений снижается. Схема подключения дополнительной RC-цепочки показана на рис.4.

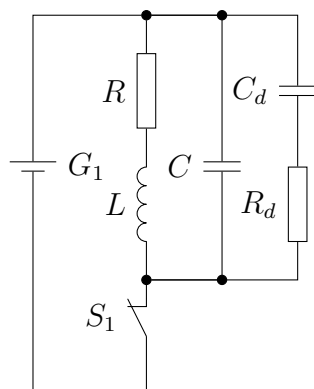


Рис. 4. Включение демпфирующей RC-цепочки ( $R_d C_d$ ) параллельной индуктивной нагрузке.

Данная схема широко применяется для защиты тиристорных схем управления трансформаторами и электродвигателями переменного тока.

**Задание** Подключить RC-цепочку параллельно индуктивной нагрузке в схеме на рис.2 и исследовать вид переходного процесса. Параметры RC-цепочки:  $R_d = 220$  Ом,  $C_d = 1$  мкФ. Произвольно изменить параметры RC-цепочки и сделать вывод о том насколько меняется амплитуда перенапряжений.

### 3.3 Демпферный диод

Самым лучшим способом подавления перенапряжений является включение параллельно индуктивной нагрузке демпферного диода в обратной полярности. Может использоваться любой кремниевый выпрямительный диод. Схема включения диода показана на рис.5. Способ не подходит для цепей переменного тока.

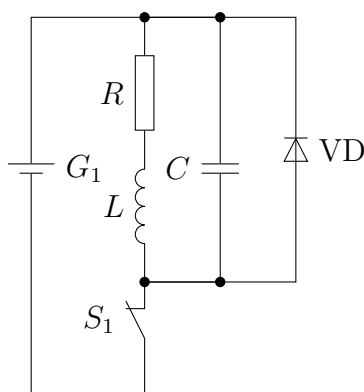


Рис. 5. Включение демпферного диода параллельной индуктивной нагрузке.

Первая полуволна затухающих колебаний на индуктивной нагрузке имеет отрицательную полярность в течение неё диод открывается и как бы закорачивает колебательный контур. Вся энергия переходного процесса поглощается диодом амплитуда выброса напряжения ограничивается напряжением открывания диода (обычно около 0,7 В для кремниевых диодов).

**Задание.** Собрать в Qucs схему рис.6 и исследовать вид переходного процесса в ней. На защите сформулировать почему данный способ не подходит для цепей переменного тока.

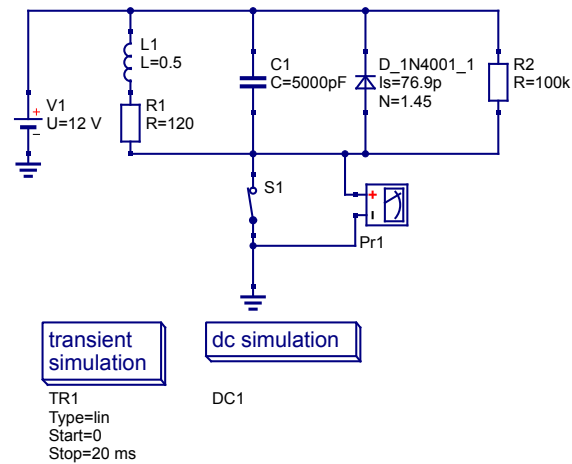


Рис. 6. Моделирование схемы подавления перенапряжений при коммутации индуктивной нагрузки при помощи диода.

## 4 Заключение

В ходе семинара были изучены способы борьбы с помехами при коммутации индуктивной нагрузки в цепях постоянного тока при помощи параллельной RC-цепочки и демпферного диода. Проведено моделирование данных схем защиты и исследована зависимость степени подавления помех от параметров этих схем.