



**ГОУ ВПО «Ижевский государственный технический  
университет имени М.Т. Калашникова»  
Кафедра «Электротехника»**

**Исследование коммутационных перенапряжений  
вакуумных контакторов**

**Выполнил студент гр. 8-83-1:**

**Алалыкин И.В.**

**Научный руководитель:**

**к.т.н Морозов В.А.**

**Цель:** Исследование природы явления зависимости коммутационных перенапряжений от параметров электрической цепи.

- Задачи:**
- 1) Понятие коммутационных перенапряжений и их классификация.
  - 2) Исследовать зависимость появления коммутационных перенапряжений от свойств цепи и вывести характеристические уравнения.
  - 3) Провести анализ полученных данных и сделать вывод.

**Ижевск 2012**

# Введение

В данное время в электроэнергетике сложилась ситуация, что наиболее изношенное оборудование— это коммутационная аппаратура. Доля отработавшего свой срок аппаратов составляет более 20 % . Таким образом, одним из первоочередных видов оборудования, которое будет заменено в ближайшее время, станут коммутационные аппараты.

Вакуумные выключатели и контакторы в настоящее время являются приоритетно рекомендуемым коммутационным оборудованием для использования в сетях средних классов напряжения. У контакторов данного типа имеется множество достоинств: высокая износостойкость, снижение эксплуатационных затрат, взрыво- и пожаробезопасность , повышенная устойчивость к ударными вибрационным нагрузкам, и т.д .Однако вместе с положительными эксплуатационными свойствами вакуумных выключателей наблюдаются и отрицательные, которые и до сих пор остаются предметом дискуссий о вакуумных выключателях и вследствие чего являются предметом исследований на протяжении многих лет.

# Коммутация электрических систем

При эксплуатации электроэнергетических систем часто возникает необходимость отключения или подключения потребителей электроэнергии, или снятия питания с отдельных участков системы для проведения обслуживания. Любая коммутация какого-либо элемента сети вызывает переходный процесс. Это связано с тем, что сеть является совокупностью индуктивностей и емкостей основного электротехнического оборудования, поэтому коммутация элемента сопровождается выделением запасенной в установке энергии, представляющей собой отношение величин амплитуд перенапряжения и рабочего напряжения, другими словами переход сети от режима до коммутации к режиму после коммутации сопровождается изменениями токов в элементах и напряжений на них. Как правило, этот переход имеет вид затухающих колебаний, в процессе которого напряжение на емкостях оборудования относительно земли или между фазами может достигать величин значительно больших, чем номинальное и оказывающих стрессовые воздействия на коммутационный аппарат и систему в целом.

# Виды коммутационных перенапряжений

- включения и отключения воздушных и кабельных линий;
- отключении ненагруженных трансформаторов;
- включения электродвигателей при автоматическом вводе резерва (АВР) или автоматическом повторном включении (АПВ);
- отключении электродвигателей;
- коммутации нагрузки вакуумными выключателями;
- дуговых замыканиях на землю;
- резонансных повышениях напряжения.

Режимы	Величина перенапряжения
Включение воздушных и кабельных линий	3,5 Uф
Отключение воздушных и кабельных линий	4,0-4,3 Uф
Отключение ненагруженных трансформаторов	5,0-6,0 Uф
Включение электродвигателей при АВР или АПВ	4,2 Uф
Отключение электродвигателей	4,0-6,0 Uф
Коммутация нагрузки вакуумными выключателями	2,6-7,0 Uф
Дуговые замыкания на землю	2,3-3,20 Uф

# Виды коммутационных перенапряжений от места приложения

- Междуфазные
- Внутрифазные
- Между контактами коммутирующей аппаратуры

## Коммутация



Оперативные(плановые) а)  
включение и отключение  
ненагруженных линий  
б) отключение ненагруженных  
трансформаторов и реакторов  
поперечной компенсации;  
в) отключение конденсаторных  
батарей

Аварийные:  
а) отключение выключателями  
короткого замыкания;  
б) автоматическое повторное  
включение линий;  
в) внезапный сброс нагрузки и  
др.

# Условия возникновения перенапряжений

Обобщение опыта эксплуатации при повреждении оборудования из-за возникновения внутренних перенапряжений позволило сформулировать три условия, сочетание которых необходимо, чтобы возникали перенапряжения

- Первое условие - параметры сети (емкость и индуктивность элементов) должны иметь характеристики, изменение которых способно привести к образованию резонансного контура в схеме нулевой последовательности.
- Второе условие - на этих участках сети внутренние перенапряжения возникают, если в контуре нулевой последовательности затухание значительно меньше критического.
- Третье условие - определенный характер начального события.

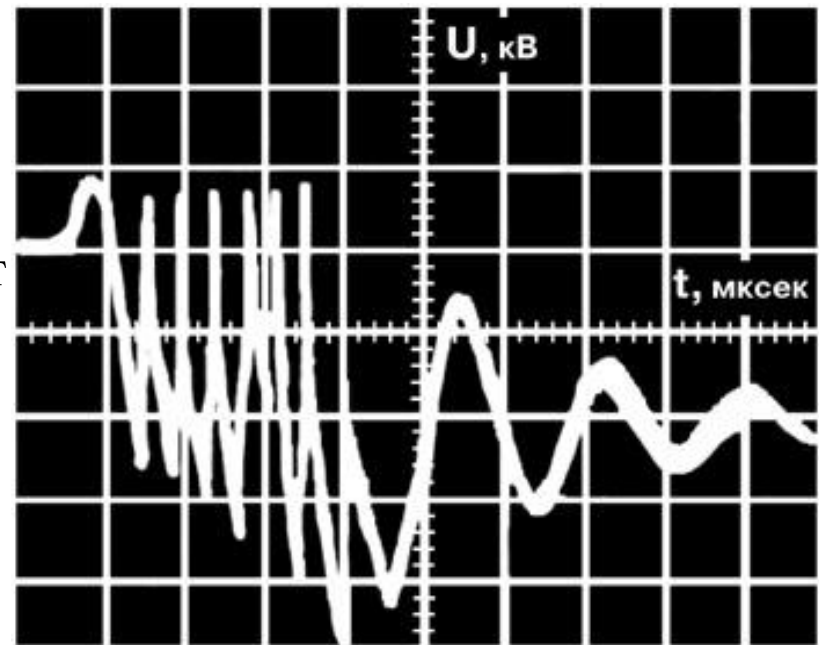
# Срез тока

Быстрый распад канала дуги и принудительный спад тока от некоторого значения (как правило, единицы - десятки ампер) до нуля за очень малое время. Срез тока характерен для любой коммутационной аппаратуры применяющегося в настоящее время. В вакуумных контакторах причиной среза тока является неустойчивость дуги при малых токах, так как она горит в парах металла контактов. При срезе тока в индуктивности нагрузки "запирается" энергия, которая затем освобождается на емкость присоединения и может вызывать перенапряжения. Современные вакуумные контакторы с хром - медными контактами имеют низкий уровень тока среза, ниже чем у прочих выключателей и ранних моделей вакуумных контакторов с контактами созданными на основе вольфрама. У вольфрамовых контактов большой ток среза обусловлен низким давлением металлического пара и большой работе выхода электронов, при малых токах плотность пара резко падает и задолго до перехода тока через ноль дуга гаснет. У хром - медных работа выхода электронов значительно ниже и плотность пара при различных значениях тока остается величиной постоянной, что обуславливает малое значение тока среза – 1,3 Ампера.

Материал контактов	Средний ток среза, А
Вольфрам	9,9
Медь бескислородная	9,4
Железо	4,4
Вольфрам — медь (W — 70 9с)	6,7
Железо — медь (Fe — 70%)	5,0
Медь — сурьма (Sb — 4%)	6,2
Медь — висмут (Bi — 5%)	3,8
Железо — медь — сурьма (Fe - 70%, Cu - 26%)	13
Вольфрам — медь — сурьма (W - 66%, Cu - 30%)	2,2
Хром — медь — висмут (Cu - 50%, Bi - 2%)	1,3

# Эскалация напряжения (многократные повторные пробои)

Вызвано способностью гасить высокочастотные токи со скоростью перехода через нуль до 50-100 А/мкс и почти мгновенно восстанавливать электрическую прочность промежутка между контактами после гашения (на уровне 15 - 60 кВ/мс ). Однако оно возникает крайне редко. При срезе тока энергия магнитного поля индуктивности переходит в энергию электрического поля эквивалентной ёмкости ,в результате сложения заряда с амплитудным значением напряжения источником питания может получиться величина превышающая восстанавливающуюся электрическую прочность и произойдет пробой межконтактного промежутка. При выполнении условия резонанса напряжений в контуре нагрузки процесс эскалации многократно повторяется что приводит к повышению уровня перенапряжения.





# Характеристики коммутационных перенапряжений

Важнейшей характеристикой перенапряжений является их кратность

$$k = \frac{U_{max}}{1,41 * U_{ном}}$$

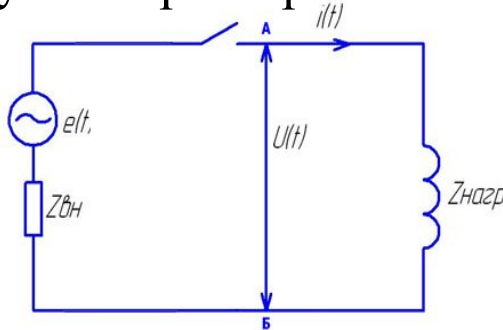
Кратность - отклонение максимального значения напряжения  $U_{max}$  к амплитуде наибольшего рабочего напряжения данном элементе  $1,41U_{ном}$ . Однако при измерениях или расчётах для определения кратности  $U_{max}$  обычно относят не к величине  $1,41U_{ном}$ , а к фактической амплитуде рабочего, имеющего место непосредственно перед появлением перенапряжения или установившегося после него.

Повторяемость определяется ожидаемым числом случаев возникновения перенапряжения за данный промежуток времени, например в год.

Форма кривой перенапряжения обуславливается длиной фронта, длительностью, числом импульсов и временем существования данного перенапряжения.

# Характеристические уравнения перенапряжения

По второму закону Кирхгофа записанному для мгновенных значений тока и напряжения для контура с индуктивным характером нагрузки характеристическое уравнение примет вид:



$$U(t) = e(t) + L \frac{di}{dt}$$

Схема замещения контура с индуктивным характером нагрузки

Для контура с активно-индуктивным характером нагрузки характеристическое уравнение примет вид:

$$U(t) = e(t) + L \frac{di}{dt} - Ri$$

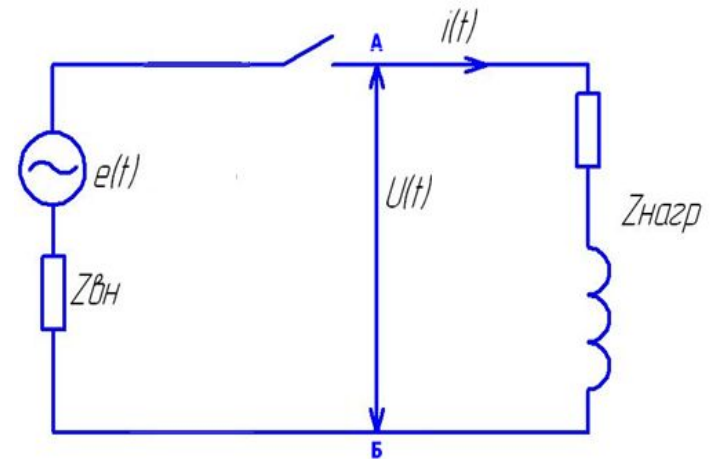
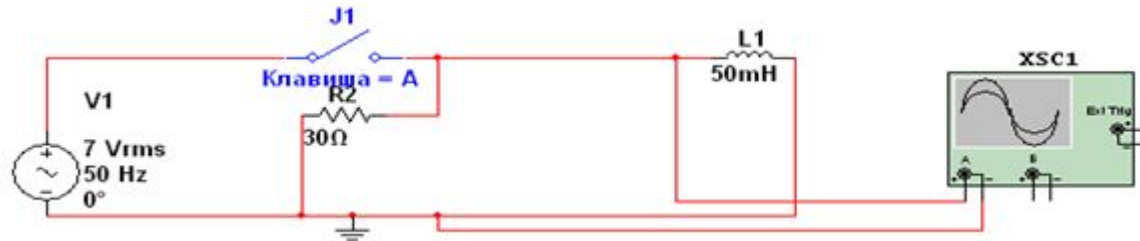


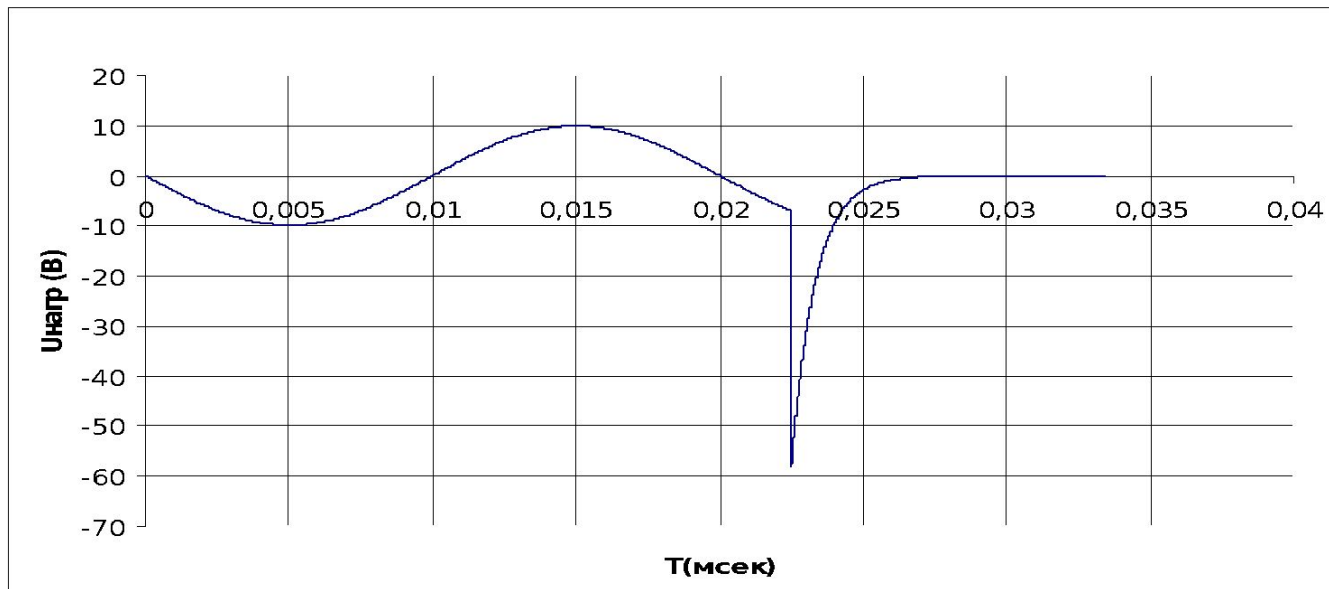
Схема замещения контура с активно-индуктивным характером нагрузки

# Теоретическое исследование в программе Multisim

Схема замещения для цепи с индуктивным характером нагрузки.

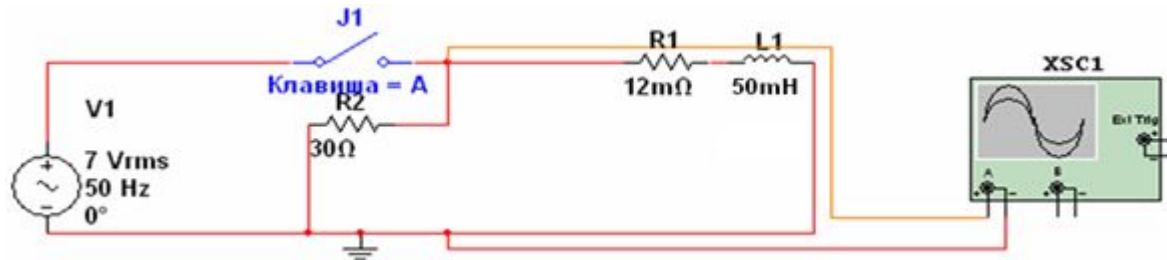


Переходный процесс при коммутации  $U(t)$

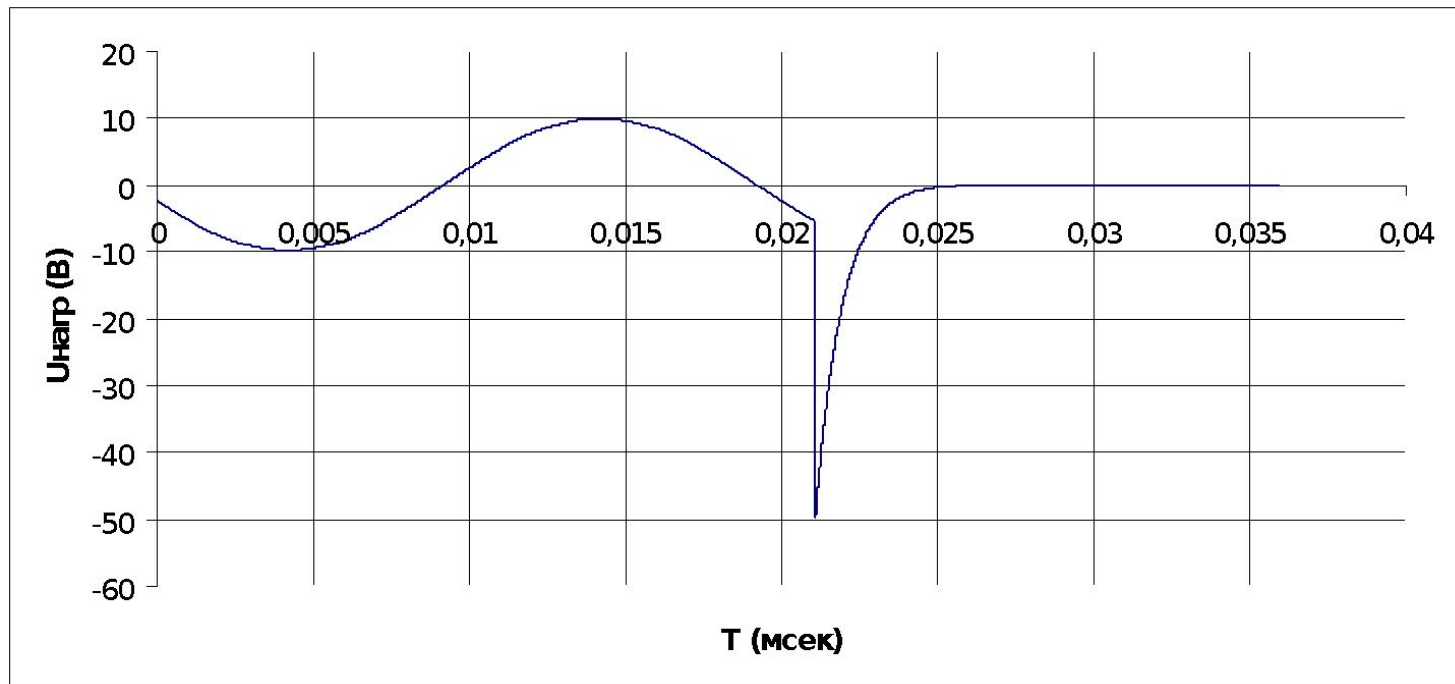


В момент коммутации наблюдается перенапряжение значением 59В  
длительность переходного процесса составляет 0,004мсек

## Схема замещения для цепи с активно индуктивным характером нагрузки



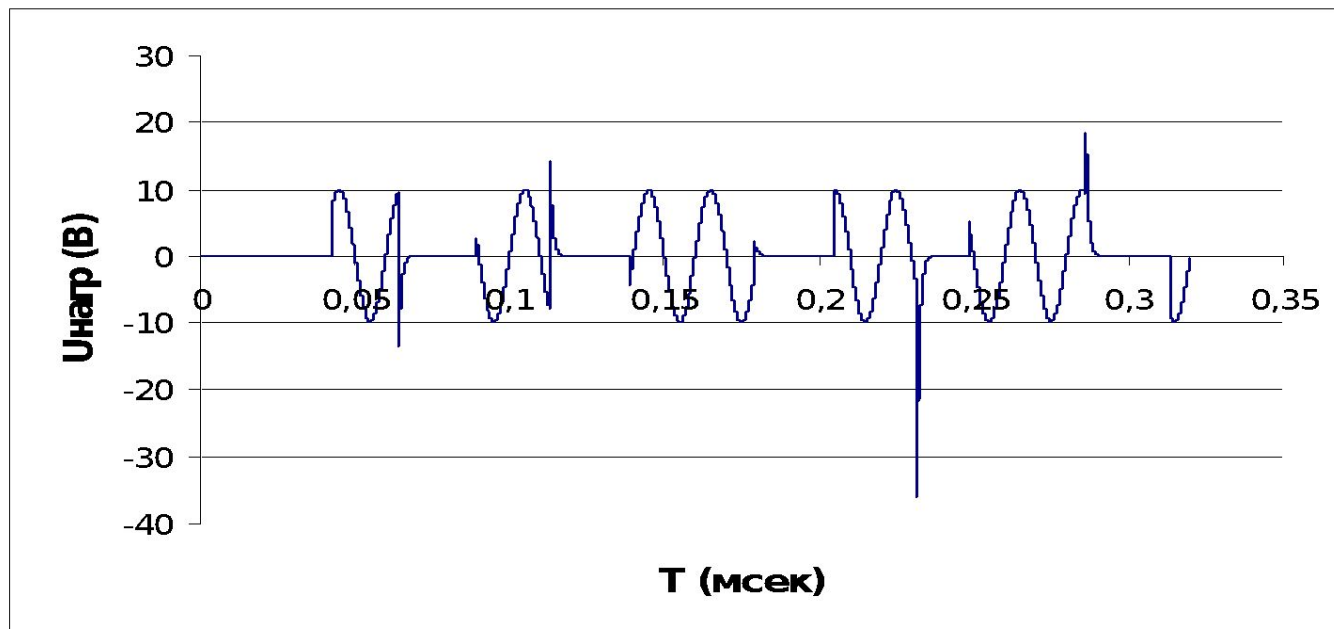
## Переходный процесс при коммутации активно-индуктивной нагрузки $U(t)$



В момент коммутации наблюдается перенапряжение значением 50В  
длительность переходного процесса составляет 0,004мсек

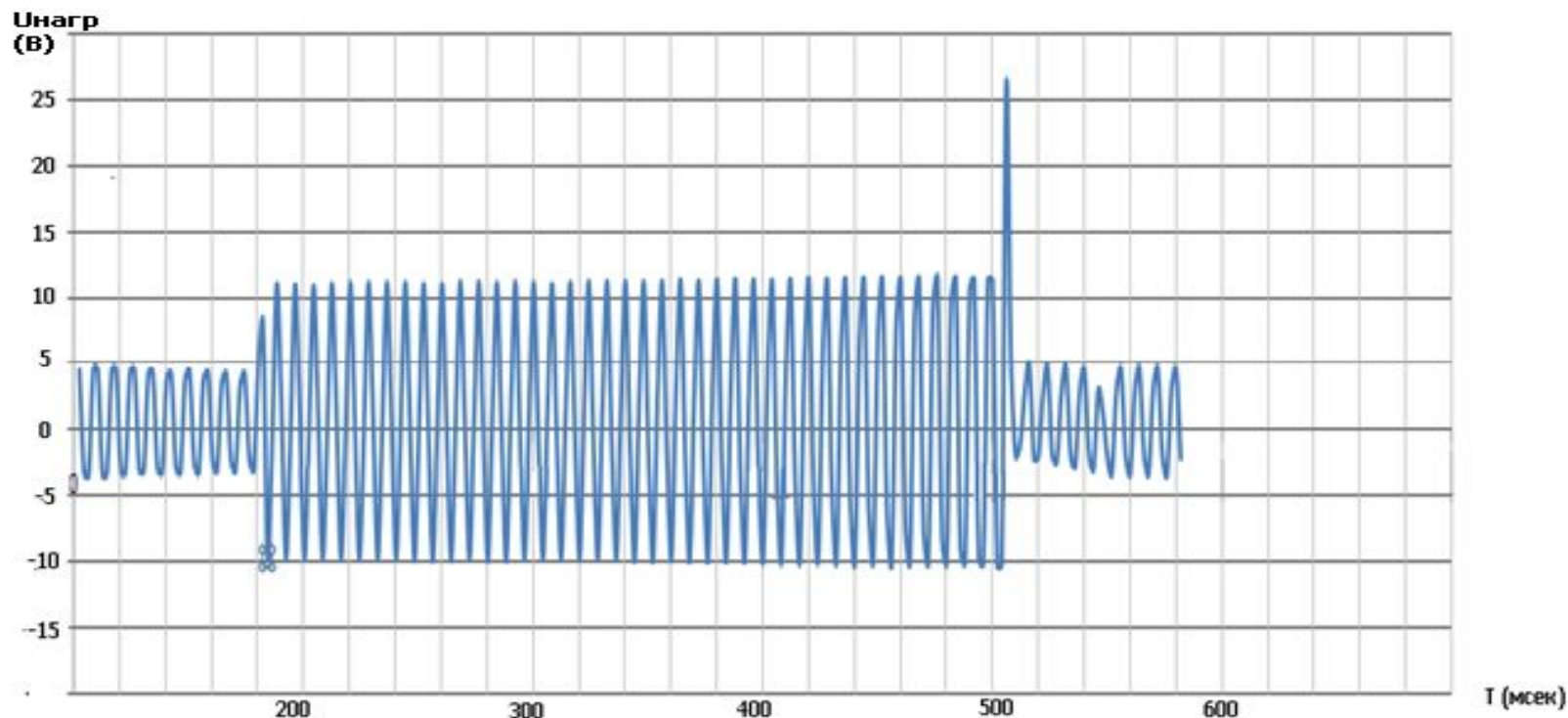
При сравнении осциллограмм полученных при коммутации цепей с нагрузкой различного характера заметна разница в величине перенапряжения, после введения активного сопротивления бросок перенапряжения снизился с 59В, до 50 что свидетельствует о корректности принятых характеристических уравнений

В характеристических уравнениях значения напряжения и тока представлены мгновенными значениями. Полученные в ходе моделирования подтверждают что фазы тока и напряжения нагрузки в момент коммутации определяют величину перенапряжения. В зависимости от этого возможно получить значения перенапряжений от нуля до максимальных его значений. Что наглядно иллюстрирует экспериментальная осциллограмма.



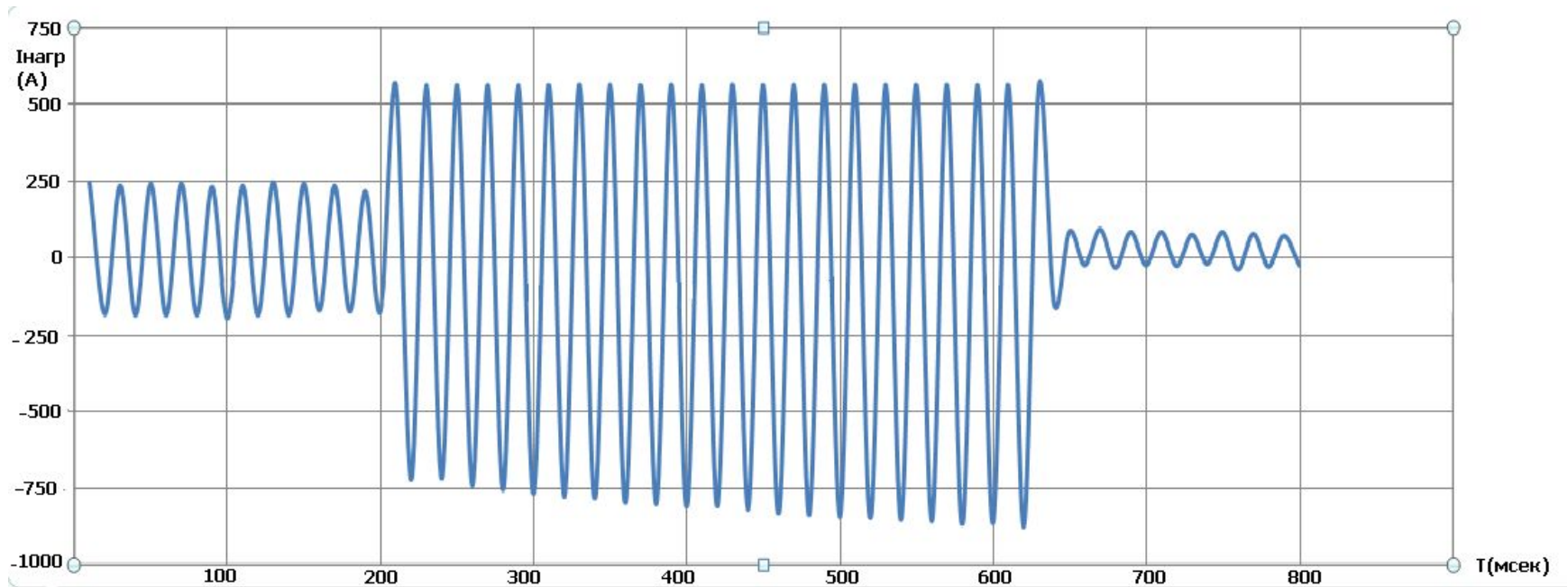
# Экспериментальные осциллограммы

Перенапряжение при коммутации индуктивной нагрузки.



В момент коммутации нагрузки отчетливо виден резкий скачок напряжения всплеск амплитуды напряжения с номинальной амплитуды 10В до 27В, чему соответствует коэффициент кратности  $K=2,7$ . Длительность перенапряжения в виду больших помех точно определить не представляется возможным.

## Осциллограмма напряжения при коммутации на активно-индуктивную нагрузку



При коммутации цепи с активно-индуктивным характером нагрузки выброса не наблюдается что противоречит теоретическим положениям и результатам проведенного моделирования. Возможно выброс не регистрируется из-за малой чувствительности платы в силу большого времени опроса или ошибками вызванными большим уровнем помех.

# Заключение

В ходе выполнения дипломного проекта была выполнена систематизация данных о причинах появления, видах коммутационных перенапряжений, результаты положены в основу при разработке и монтаже лабораторного стенда по исследованию коммутационных перенапряжений. Экспериментально снятые характеристики переходного процесса коммутации проанализированы согласно теории и подтверждают принятые теоретические модели и разработанные в программе моделирования multisim.



Спасибо за внимание