

Министерство образования и науки Российской Федерации
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

**РАСЧЕТ И КОМПЬЮТЕРНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕПЕЙ
СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА
В УСТАНОВИВШЕМСЯ
РЕЖИМЕ
(от простого к сложному)**

Утверждено
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия

НОВОСИБИРСК
2018

УДК 621.3.011.7:004.94(075.8)
Р 248

Коллектив авторов:
Ф.Э. Лаппи, Ю.Б. Ефимова, П.В. Морозов, О.Э. Пауль

Рецензенты:
д-р техн. наук, проф. *В.Ю. Нейман*,
д-р техн. наук, проф. *Д.Л. Калужский*

Работа подготовлена на кафедре ТОЭ
для студентов дневного и заочного отделений
электротехнических специальностей

Р 248 **Расчет и компьютерное моделирование цепей синусои-
дального тока в установившемся режиме (от простого к
сложному): учебное пособие / Ф.Э. Лаппи, Ю.Б. Ефимова,
П.В. Морозов, О.Э. Пауль. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. –
104 с.**

ISBN 978-5-7782-3657-8

Рассматриваются основные понятия и методы анализа установившихся режимов работы линейных цепей синусоидального тока. Показано применение компьютерных программных продуктов для расчета и схематехнического моделирования данных цепей, что является важным для дальнейшего анализа как установившихся, так и переходных режимов в электрических и электронных цепях практически любой сложности.

Материал пособия включает в себя краткие теоретические сведения, примеры задач с анализом их решения, задания для самостоятельного решения с ответами, а также примеры использования численного и схематехнического моделирования.

Настоящее пособие рекомендуется студентам в рамках освоения ими основной образовательной программы по электротехническим дисциплинам, а также для самостоятельной работы в целях подготовки к тестированию и аттестационным экзаменам.

УДК 621.3.011.7:004.94(075.8)

ISBN 978-5-7782-3657-8

© Коллектив авторов, 2018
© Новосибирский государственный
технический университет, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Основные понятия, используемые при анализе электрических цепей	5
2. Компьютерное схемотехническое моделирование электрических цепей синусоидального тока	11
3. Законы Кирхгофа и Ома мгновенных значений в электрических цепях	15
4. Основы символического метода анализа цепей синусоидального тока	20
4.1. Арифметические действия на комплексной плоскости	21
4.2. Представление синусоидальной ЭДС вектором на комплексной плоскости	26
4.3. Закон Ома в символической форме и расчетные модели	28
4.4. Расчет цепей с использованием законов Кирхгофа и Ома в символической (комплексной) форме	33
4.5. Расчет цепей синусоидального тока в установившемся режиме работы методами контурных токов, узловых потенциалов, эквивалентного генератора	51
4.6. Расчет сложных цепей синусоидального тока в установившемся режиме	66
Заключение	84
Библиографический список	85
Приложения	86
Приложение 1	86
Приложение 2	102

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ АНАЛИЗЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Основные физические понятия и величины, используемые при анализе любого электромагнитного процесса, приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Основные физические понятия и величины для анализа

Обозначение	Понятие	Единица измерения	Главная формула
q	Электрический заряд	Кулон (Кл)	–
Ψ	Потокосцепление	Вебер (Вб)	–
i	Электрический ток	Ампер (А)	$i = \frac{dq}{dt}$
φ	Электрический потенциал	Вольт (В)	
u	Напряжение (разность потенциалов двух точек)	Вольт (В)	$u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$
p	Мгновенная мощность	Ватт (Вт)	$p = ui$

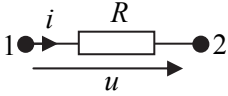
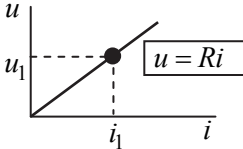
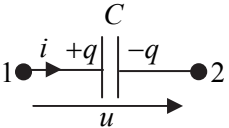
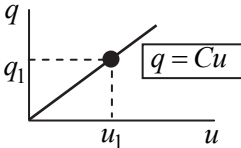
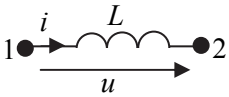
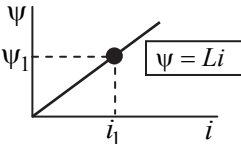
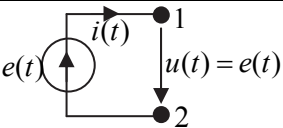
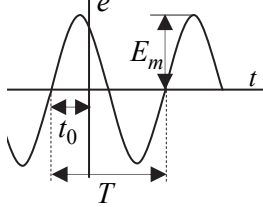
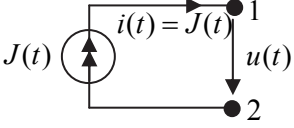
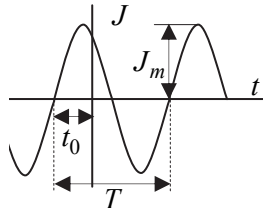
В настоящем пособии рассматриваются электрические цепи, в которых токи и напряжения изменяются во времени по синусоидальному закону $i = \frac{dq}{dt} = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$. Такие цепи получили название цепей синусоидального тока. Основные элементы цепей синусоидального тока показаны в табл. 2, при этом:

- условно-положительные направления токов выбираются произвольно, но обычно слева направо и сверху вниз;

- направление напряжения на элементе принимается совпадающим с выбранным направлением тока.

Таблица 2

Основные элементы цепей синусоидального тока

Название элемента	Изображение элемента	Основная характеристика
<p>Резистор</p> $u = Ri$		
<p>Конденсатор</p> $i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}$		
<p>Катушка индуктивности</p> $u = \frac{d\psi}{dt} = L \frac{di}{dt}$		
<p>Источник электродвижущей силы (ЭДС)</p> $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$	 $e(t) = E_m \sin \omega(t + t_0) = E_m \sin(\omega t + \varphi_0)$	
<p>Источник тока</p>	 $J(t) = J_m \sin \omega(t + t_0) = J_m \sin(\omega t + \varphi_0)$	

Описание основных характеристик элементов (табл. 2)

1. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) резистора – это прямая, проходящая через начало координат (см. табл. 2), линейная ВАХ, в которой отношение напряжения к току постоянно и равно величине

сопротивления $R = \frac{u}{i}$, поэтому ток и напряжение в резисторе имеют одинаковый характер изменения, так как связаны законом Ома $u = Ri$.

В резисторе происходит преобразование энергии электромагнитного поля в тепловую. Мощность преобразования определяется законом Джоуля–Ленца, который при использовании действующих значений токов и напряжений имеет вид $P_R = U_R I = I^2 R$.

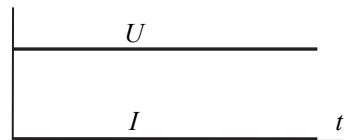
2. Кулон-вольтная характеристика конденсатора – прямая, проходящая через начало координат (см. табл. 2), поэтому говорят, что она линейна, в ней отношение заряда к напряжению постоянно и равно

величине емкости $C = \frac{q}{u}$. При анализе электрических цепей в первую очередь представляет интерес связь между током и напряжением на

элементе: $i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}$; $u = \frac{1}{C} \int idt$. Отсюда следует, что ток в конденсаторе определяется не величиной напряжения между обкладками конденсатора, а скоростью изменения напряжения. Рассмотрим три случая изменения напряжения на конденсаторе.

- Напряжение на конденсаторе постоянно: $U = \text{const}$,

Ток через конденсатор равен нулю. Это означает, что конденсатор разрывает цепь тока, если напряжение на нем постоянно (см. рисунок).



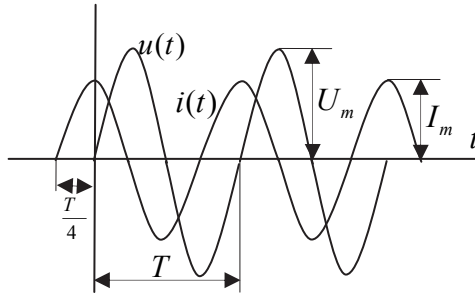
- Напряжение на конденсаторе меняется по синусоидальному закону: $u(t) = U_m \sin \omega t$. Ток через конденса-

тор $i(t) = C \frac{du}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$.

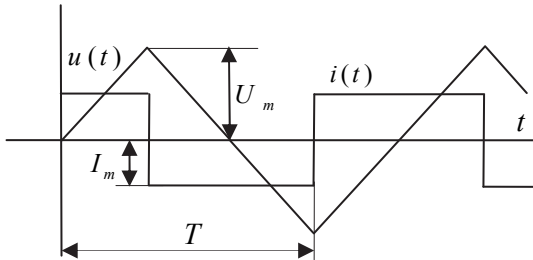
Следовательно, ток, как и напряжение, меняется по гармоническому закону, но по начальной фазе опережает напряжение на 90° (четверть периода, см. рисунок). Амплитуды тока и напряжения связаны законом Ома:

$$I_m = \omega C U_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}},$$

т. е. в цепи синусоидального тока конденсатор в расчетном смысле — это сопротивление, величина которого определяется выражением $x_C = \frac{1}{\omega C}$.



- Напряжение на конденсаторе меняется по пилообразному закону. С помощью графического трактования производной получим, что через конденсатор в течение полупериода протекает постоянный ток (см. рисунок).



3. Вебер-амперная характеристика катушки индуктивности — это прямая, проходящая через начало координат (см. табл. 2), поэтому говорят, что она линейная: во сколько раз меняется потокосцепление, во столько же раз меняется и ток в катушке индуктивности, а их

отношение остается постоянным и равным величине индуктивности

$L = \frac{\Psi}{i}$. Представляет интерес связь между током и напряжением на

элементе. Вебер-амперная характеристика такого ответа напрямую не

дает. Чтобы найти связь между током и напряжением в катушке ин-

дуктивности, воспользуемся выражениями: $u = \frac{d\Psi}{dt} = L \frac{di}{dt}$; $i = \frac{1}{L} \int u dt$.

Отсюда следует, что напряжение на катушке индуктивности определя-

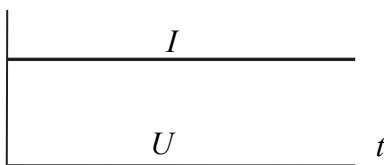
ется не величиной тока в ней, а скоростью изменения тока. Рассмотрим

три случая изменения тока в катушке индуктивности.

- Ток в катушке индуктивности постоянный: $I = \text{const}$, тогда оче-

видно, что напряжение на зажимах катушки индуктивности равно

нулю (см. рисунок). В расчетном смысле – это короткозамкнутый уча-



- Ток в катушке индуктивности меняется по синусоидальному закону: $i(t) = I_m \sin \omega t$. Напряжение на

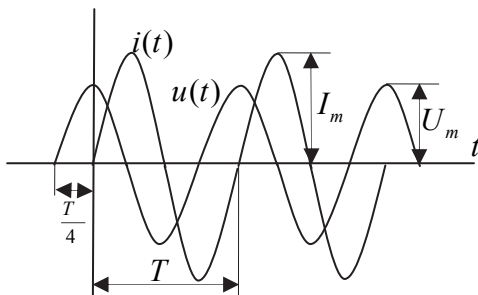
зажимах катушки индуктивности будет равно: $u(t) = L \frac{di}{dt} =$

$= \omega L I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ)$. Сравнивая выражения для тока и

напряжения, можно сделать два важных вывода:

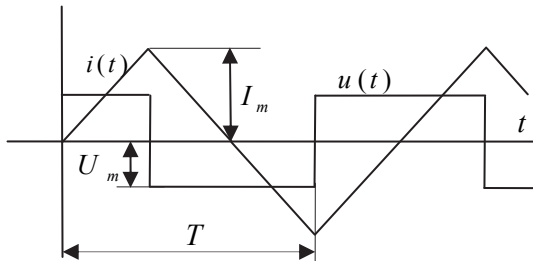
а) напряжение, как и ток, меняется по гармоническому закону, но по

начальной фазе опережает ток на 90° (четверть периода, см. рисунок);



б) амплитуды тока и напряжения связаны между собой законом Ома: $U_m = \omega L I_m$. Отсюда следует важный вывод: в цепи синусоидального тока катушка индуктивности в расчетном смысле – это сопротивление, величина которого определяется выражением $x_L = \omega L$.

- Если ток меняется по пилообразному закону, то, используя графическое трактование производной, получим, что напряжение на зажимах катушки индуктивности в течение полупериода остается постоянным (см. рисунок).



Емкость и индуктивность получили название реактивных элементов электрической цепи. Это означает, что их поведение в цепи зависит от формы воздействующего сигнала (тока, напряжения).

2. КОМПЬЮТЕРНОЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Экспериментальная схема (рис. 1) содержит источник синусоидальной ЭДС, пассивные элементы (резистор и катушка индуктивности) и измерительные приборы (амперметр, вольтметры и блок измерения активной мощности (ваттметр)). Рассматриваемая компьютерная программа предназначена для схематического представления и моделирования аналоговых, цифровых и аналогово-цифровых цепей. Пакет включает в себя средства редактирования, моделирования и виртуальные инструменты тестирования электрических схем, а также дополнительные средства анализа моделей.

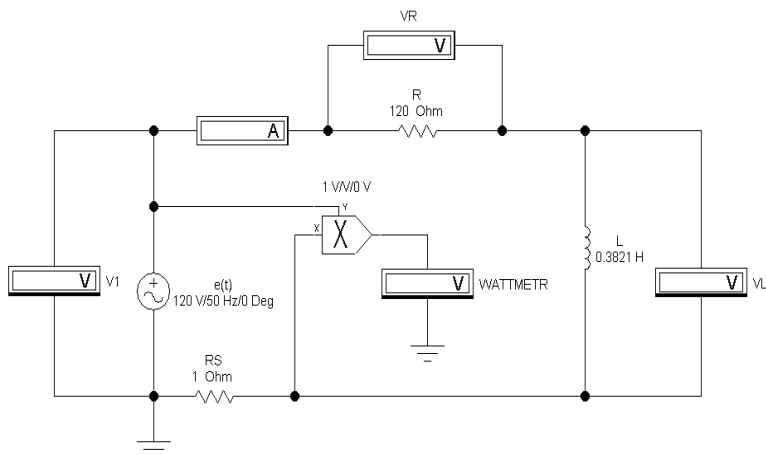


Рис. 1. Экспериментальная схема для исследования R - L цепи