

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

С.В.Пустынников, Хан Вей, Е.Б.Шандарова

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2013

УДК 621.3(075.8)

ББК 31.2я73

П896

Пустынников С.В., Хан Вей, Шандарова Е.Б.,
П896 **Общая электротехника: учебное пособие / С.В Пустынников; Хан Вей; Е.Б.Шандарова. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 102 с.**

В учебном пособии изложены основные темы, изучаемые в дисциплине «Общая электротехника». К темам разработаны терминологические словари на английском и китайском языках и предложены задачи для самостоятельного решения. Представлены расчетно-графические работы по расчету цепей постоянного тока, синусоидального тока и по переходным процессам, даны методические указания по их выполнению. Предназначено для китайских студентов ИМОЯК, изучающих электротехнику.

УДК 621.3(075.8)
ББК 31.2я73

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор ТПУ
Ю.П.Усов

Ведущий научный сотрудник научно-исследовательского института оптики атмосферы СО РАН, доктор физико-математических наук,
профессор *Ф.Ю.Канев*

© ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, 2013

© Пустынников С.В., Хан Вей, Шандарова Е.Б., 2013

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие предназначено для занятий по дисциплине «Общая электротехника» в группах китайских студентов, обучающихся на русском языке.

В учебном пособии в краткой форме изложены основные темы, изучаемые в дисциплине «Общая электротехника». По каждой теме разработан терминологический словарь на английском и китайском языках и предложены задачи для самостоятельного решения. Представлены также три расчетно-графические работы по расчету цепей постоянного тока, синусоидального тока и по переходным процессам, даны методические указания по их выполнению. Учебное пособие позволяет значительно облегчить изучение курса «Общей электротехники» и является дополнением к лекционному и практическому курсу по данной дисциплине.

ТЕМА 1. ЭЛЕМЕНТЫ И ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ, МЕТОДЫ РАСЧЕТА ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. **Электротехника** – наука, изучающая практическое применение электромагнитных явлений в технике.

2. **Электрическое поле** проявляет свойства по силовому воздействию на неподвижные заряженные тела.

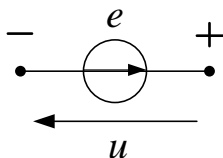
3. **Магнитное поле** проявляет свойства по силовому воздействию на незаряженные проводники с токами

4. **Электрический ток** i , A (Ампер) – направленное движение электрических зарядов (электронов, ионов)

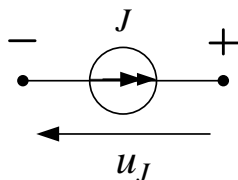
5. **Потенциал** φ , B (Вольт) электрического поля в точке « a » – это потенциальная энергия, которой обладает единичный заряд, помещенный в точку « a »

6. **Напряжение** равно разности электрических потенциалов в точках « a » и « b » $u = \varphi_a - \varphi_b$, B

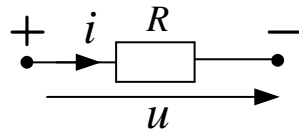
7. **Идеальный независимый источник ЭДС** e , B – это источник, разность потенциалов на зажимах которого не зависит от тока в нём $u = e$. Внутреннее сопротивление идеального источника ЭДС равно нулю. **В цепи постоянного тока:** $e = E = const$, $u = U$, $i = I$.



8. **Идеальный независимый источник тока** J , A – это источник, величина тока которого не зависит от напряжения на его зажимах $i = J$. Внутреннее сопротивление идеального источника тока равно бесконечности. **В цепи постоянного тока:** $J = const$, $u_J = U_J$.

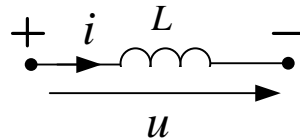


9. **Активное сопротивление (резистор)** R , Ω необратимо преобразует электрическую энергию в тепловую. Связь между током и напряжением описывается **законом Ома** $u = iR$.



Мощность p , Вт (Ватт), потребляемая резистором, определяется по **закону Джоуля-Ленца**: $p = ui = i^2 R$. На основании этого закона составляется баланс мощности в электрической цепи: **мощность источников электроэнергии равна мощности потребляемой** $P_{\text{И}} = P_{\text{П}}$.

10. Индуктивность L , Гн (Генри) – физическая величина, характеризующая магнитные свойства электрической цепи. Индуктивность запасает энергию в магнитном поле $W_{\text{М}} = \frac{L \cdot i^2}{2}$, Дж (Джоуль)

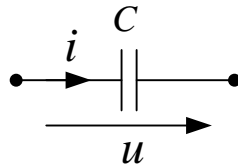


Связь между током и напряжением описывается **законом электромагнитной индукции** $u = L \frac{di}{dt}$ или $i = \frac{1}{L} \int u dt$.

При постоянном токе $i = I = \text{const}$ индуктивность имеет нулевое сопротивление и является «закороткой»:

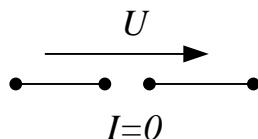


11. Ёмкость C , Ф (Фарада) – физическая величина, характеризующая способность накапливать электрический заряд в электрическом поле конденсатора. Величина запасаемой энергии равна $W_{\text{эл}} = \frac{C \cdot u^2}{2}$, Дж



Связь между током и напряжением: $i = C \frac{du}{dt}$ или $u = \frac{1}{C} \int i dt$.

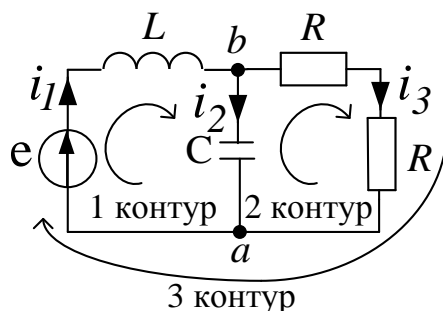
При постоянном напряжении $u = U = \text{const}$ ёмкость имеет бесконечно большое сопротивление и является «разрывом цепи»:



12. Проводимость – величина, обратная сопротивлению

$$g = \frac{1}{R}, \text{ См (Сименс)}$$

13. Схема замещения – это графическое изображение реальной электрической цепи.



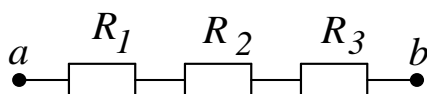
Ветвь – такое соединение элементов цепи, при котором по ним протекает одинаковый ток. В схеме на рисунке три ветви с токами i_1, i_2, i_3 .

Узел – точка соединения не менее трех ветвей. В схеме два узла a и b .

Контур – замкнутый путь, проходящий по ветвям схемы. На рисунке схема имеет три контура (направление обхода контуров указано стрелками).

Независимый контур содержит хотя бы одну ветвь, не входящую в другие контуры. На рисунке схема имеет два независимых контура.

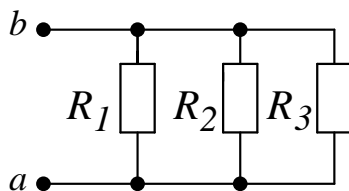
14. Последовательное соединение резисторов – это соединение резисторов в одной ветви: $R_{ab} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots R_n$



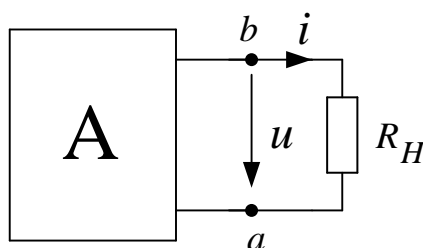
15. Параллельное соединение резисторов – это соединение резисторов

между двумя узлами: $\frac{1}{R_{ab}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$

или $g_{ab} = g_1 + g_2 + g_3 + \dots$



16. Двухполюсник – это часть схемы, имеющая два выходных зажима a, b , к которым подключается сопротивление нагрузки R_H .

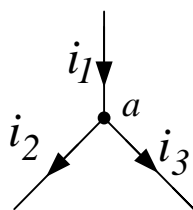


Активный двухполюсник содержит источники электроэнергии и обозначается буквой **A**, **пассивный двухполюсник** не содержит источники электроэнергии и обозначается буквой **П**.

17. Линейная цепь. В линейных цепях параметры R, L, C не зависят от приложенных к ним напряжений и протекающих в них токах.

18. Первый закон Кирхгофа – алгебраическая сумма токов в узле равна нулю, причем со знаком плюс берутся токи, входящие в узел, а со знаком минус – выходящие из узла. $\sum i_k = 0$.

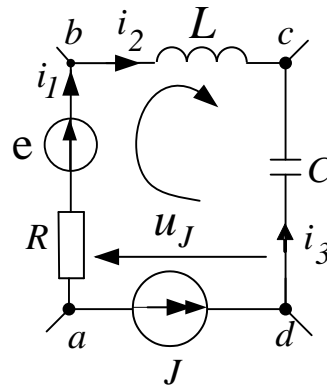
Для узла a : $i_1 - i_2 - i_3 = 0$



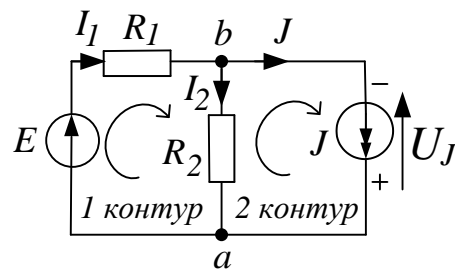
19. Второй закон Кирхгофа – алгебраическая сумма напряжений на элементах цепи и источниках тока равна алгебраической сумме ЭДС контура, причем со знаком плюс берутся те напряжения и ЭДС, поло-

жительные направления которых совпадают с направлением обхода контура. $\sum u_K = \sum e_K$. Для контура *abcd*: $u_R + u_L - u_C + u_J = e$ или

$$i_1 R + L \frac{di_2}{dt} - \frac{1}{C} \int i_3 dt + U_J = e$$



20. Метод законов Кирхгофа: если цепь содержит число ветвей N_B и число узлов N_Y , то для расчета числа N_B неизвестных токов ветвей и напряжений на источниках тока составляется число $N_Y - 1$ независимых уравнений по 1 закону Кирхгофа и число $N_B - N_Y + 1$ независимых уравнений по 2 закону Кирхгофа.



Число ветвей $N_B = 3$, число узлов $N_Y = 2$. **Заданы:** E, J, R_1, R_2 .

Определить: I_1, I_2, U_J . Система уравнений по законам Кирхгофа:

$$\text{узел } a : I_1 - I_2 = J$$

$$1 \text{ контур} : I_1 R_1 + I_2 R_2 = E$$

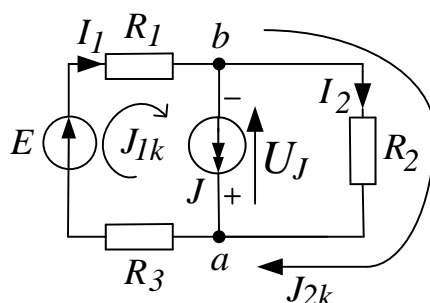
$$2 \text{ контур} : -U_J - I_2 R_2 = 0$$

Баланс мощности. Мощность источников: $p_{ист.} = E \cdot I_1 + U_J \cdot J$

$$\text{Потребляемая мощность: } p_{\text{потр.}} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$$

21. Метод контурных токов. В расчет вводятся вспомогательные величины - **контурные токи**, каждый из которых замыкается по ветвям своего контура. Токи в ветвях представляют собой алгебраические суммы контурных токов, протекающих по тем же ветвям.

Если схема содержит источник тока, то через него должен проходить только один контурный ток, равный по величине и направлению току источника тока.



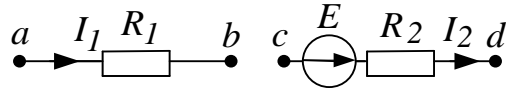
Задаем контурные токи так, чтобы через каждую ветвь схемы проходил хотя бы один контурный ток. Контурный ток, проходящий через источник тока, равен: $J_{1k} = J$. Для определения неизвестного контурного тока J_{2k} составляем уравнение:

$$J_{2k}(R_1 + R_2 + R_3) + J_{1k}(R_1 + R_3) = E$$

Знак «+» в уравнении берется потому, что контурные токи, протекающие совместно в ветви с сопротивлениями R_1, R_3 , совпадают по направлению. Ток J_{2k} и ЭДС E также совпадают по направлению.

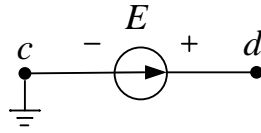
Токи ветвей схемы: $I_1 = J_{1k} + J_{2k}; I_2 = J_{2k}$

22. Метод узловых потенциалов. Токи в ветвях схемы выражаются с помощью закона Ома через потенциалы узлов:

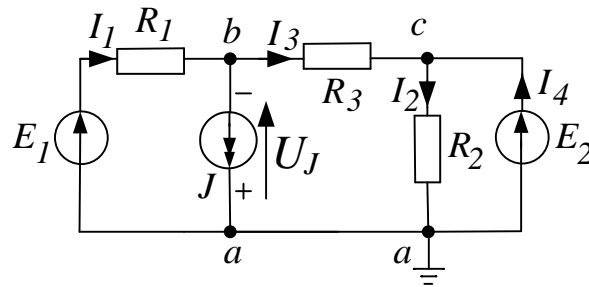


$$I_1 = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R_1} = (\varphi_a - \varphi_b)g_1; \quad I_2 = \frac{\varphi_c - \varphi_d + E}{R_2} = (\varphi_c - \varphi_d + E)g_2$$

Потенциал одного из узлов, принятого за *опорный узел*, принимается равным нулю. Если схема содержит ветвь с источником ЭДС без сопротивления, то за *опорный узел* берется любой из узлов, к которым подключена эта ветвь. $\varphi_c = 0$, $\varphi_d = E$.



Для остальных узлов составляются уравнения по 1 закону Кирхгофа для токов, выраженных через потенциалы узлов.



Потенциал опорного узла: $\varphi_a = 0$, тогда $\varphi_c = E_2$. Для узла *b* составляем уравнение: $\varphi_b(g_1 + g_3) - \varphi_c g_3 - \varphi_a g_1 = E_1 g_1 - J$.

Определяем токи ветвей:

$$I_1 = (\varphi_a - \varphi_b + E_1)g_1, \quad I_2 = (\varphi_c - \varphi_a)g_2, \quad I_3 = (\varphi_b - \varphi_c)g_3.$$

По 1 закону Кирхгофа определяем ток: $I_4 = I_2 - I_3$. Напряжение на источнике тока равно: $U_J = \varphi_a - \varphi_b$.

23. Метод наложения. В схеме, содержащей несколько источников ЭДС и источников тока, ток в любой ветви равен алгебраической сумме частичных токов от действия каждого источника в отдельности:

$$I_k = I'_k + I''_k + \dots + I_k^n. \text{ Для схемы: } I_2 = I'_2 + I''_2$$

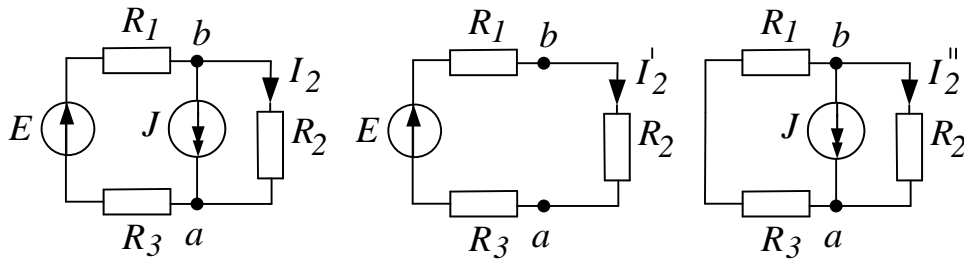


схема = 1 подсхема + 2 подсхема

В первой подсхеме размыкаем источник тока, имеющий бесконечное внутреннее сопротивление, и определяем: $I'_2 = \frac{E}{R_1 + R_2 + R_3}$.

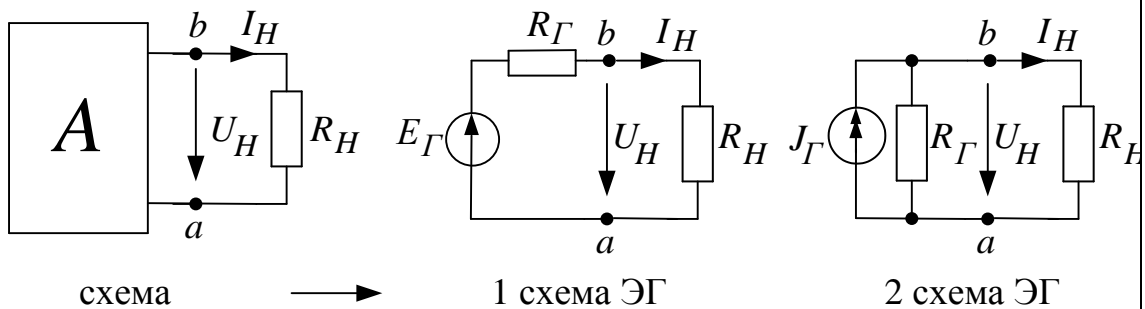
Во второй подсхеме замыкаем источник ЭДС, имеющий нулевое внутреннее сопротивление, и определяем: $I''_2 = -J \frac{R_1 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$

24. Метод эквивалентного генератора (ЭГ). Любую сложную схему, содержащую источники электрической энергии, относительно ветви с нагрузкой можно заменить активным двухполюсником. Этот двухполюсник можно преобразовать до двух эквивалентных параметров:

E_Γ - ЭДС генератора и R_Γ - сопротивление генератора или

$J_\Gamma = \frac{E_\Gamma}{R_\Gamma}$ - источник тока генератора и R_Γ - сопротивление генератора.

нератора.



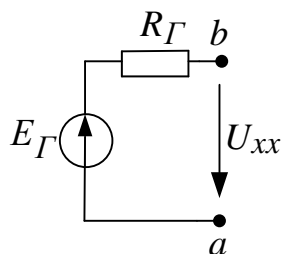
Ток в нагрузке определяется по **формуле Тевенена-Гельмгольца**

для 1 схемы ЭГ: $I_H = \frac{E_\Gamma}{R_\Gamma + R_H}$ и по **формуле Нортон-Поливанова**

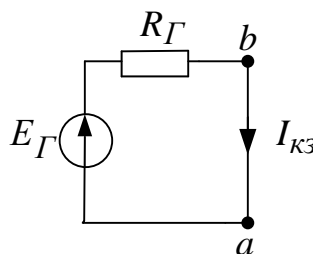
для 2 схемы ЭГ: $I_H = \frac{J_\Gamma}{1 + \frac{R_H}{R_\Gamma}}$

Параметры ЭГ можно определить тремя методами:

1) из **опытов холостого хода (XX) и короткого замыкания (КЗ)**:



опыт XX

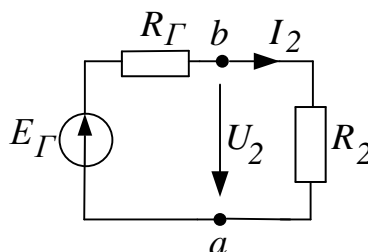
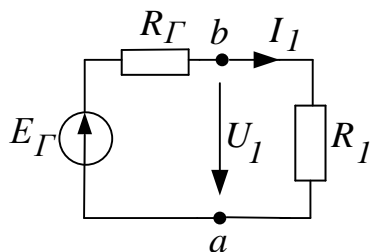


опыт КЗ

В опыте XX: $R_H = \infty, I = 0, U_{XX} = E_\Gamma$;

В опыте КЗ: $R_H = 0, U_H = 0, R_\Gamma = \frac{U_{XX}}{I_{K3}}$.

2) **метод двух нагрузок:**



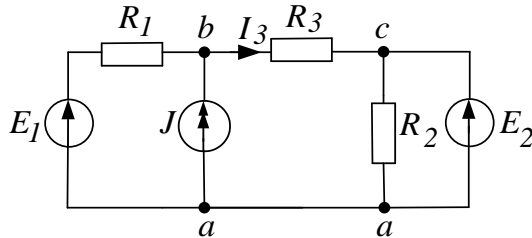
Задаются два разных сопротивления нагрузки R_1 и R_2 , измеряются напряжения U_1, U_2 и токи I_1, I_2 . Составляется система уравнений

по 2 закону Кирхгофа: $\begin{cases} E_\Gamma = U_1 + I_1 R_\Gamma \\ E_\Gamma = U_2 + I_2 R_\Gamma \end{cases}$, после решения которой, по-

лучаем:

$$E_{\Gamma} = \frac{U_2 I_1 - U_1 I_2}{I_1 - I_2}, R_{\Gamma} = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2}.$$

3) расчетный метод



расчетная схема

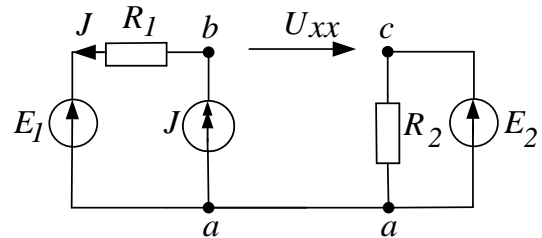
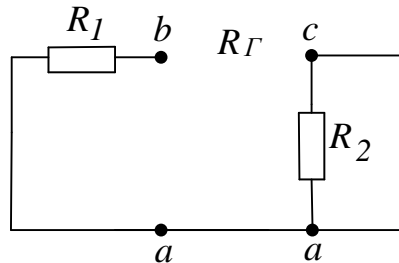


схема опыта XX

В расчетной схеме необходимо определить ток I_3 . Рисуем схему опыта XX, в котором $R_H = \infty$, и определяем по 2 закону Кирхгофа напряжение холостого хода на разомкнутых зажимах нагрузки:

$$E_{\Gamma} = U_{XX} = E_1 - E_2 + JR_1.$$

Для определения R_{Γ} рисуем вспомогательную схему, в которой источники ЭДС замкнуты, а источники тока разомкнуты:

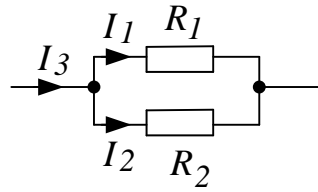


Так как сопротивление R_2 замкнуто накоротко, получаем:

$$R_{\Gamma} = R_1. \text{ Определяем ток в нагрузке: } I_3 = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + R_3}.$$

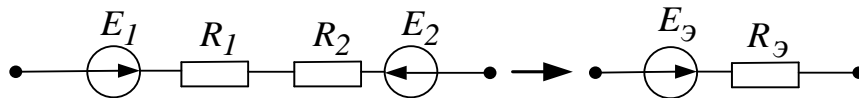
25. Эквивалентные преобразования электрических схем.

а) Правило распределения токов в параллельных ветвях («правило разброса»):



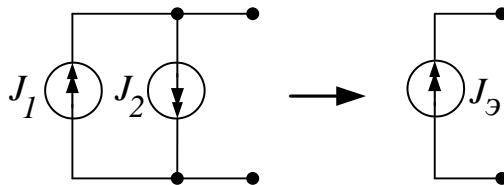
$$I_1 = I_3 \frac{R_2}{R_1 + R_2}, I_2 = I_3 \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

б) Последовательное соединение ЭДС и сопротивлений:



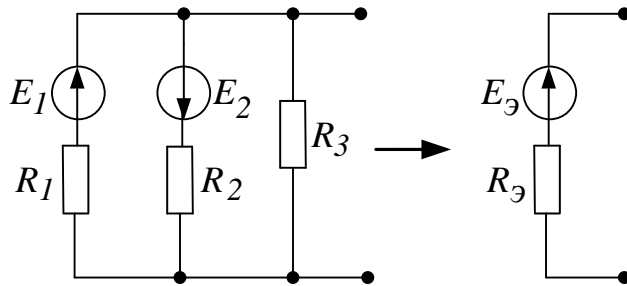
$$E_{\mathcal{E}} = E_1 - E_2, R_{\mathcal{E}} = R_1 + R_2.$$

в) Параллельное соединение источников тока:



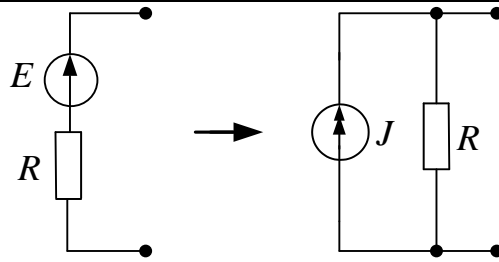
$$J_{\mathcal{E}} = J_1 - J_2.$$

г) Параллельное соединение ветвей с ЭДС и сопротивлениями:



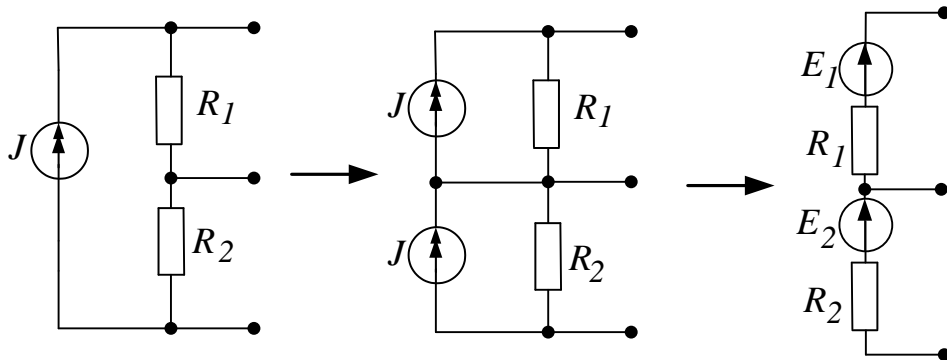
$$\frac{1}{R_{\mathcal{E}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, E_{\mathcal{E}} = \left(\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_2}{R_2} \right) \cdot R_{\mathcal{E}}.$$

д) Эквивалентная замена источника ЭДС на источник тока и наоборот:



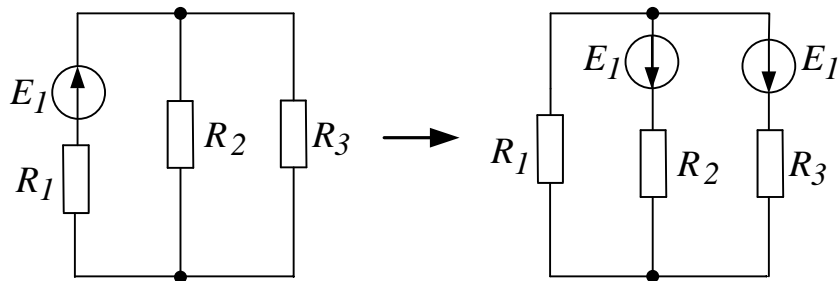
$$J = \frac{E}{R}$$

е) Перенос источника тока:

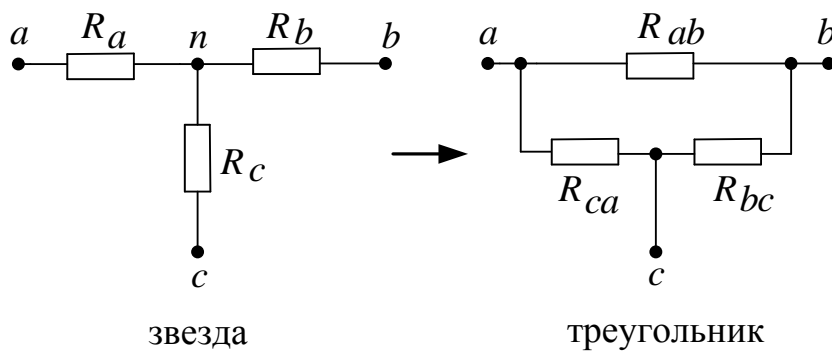


где $E_1 = J_1 R_1, E_2 = J_2 R_2$

ж) Перенос источника ЭДС через узел:



з) Преобразование звезды в треугольник и наоборот:



Сопротивления сторон треугольника: $R_{ab} = R_a + R_b + \frac{R_a R_b}{R_c}$,

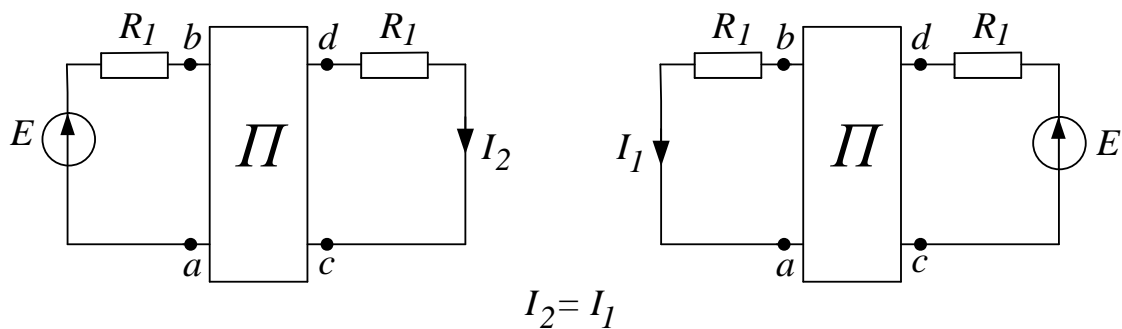
$$R_{bc} = R_b + R_c + \frac{R_b R_c}{R_a}, \quad R_{ca} = R_c + R_a + \frac{R_c R_a}{R_b}.$$

Сопротивления лучей звезды:

$$R_a = \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}, \quad R_b = \frac{R_{bc} R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}, \quad R_c = \frac{R_{ca} R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}.$$

26. Свойства линейных цепей.

а) *Принцип взаимности.* Применяется для цепи с одним источником ЭДС. Ток I_{cd} в ветви cd , создаваемый ЭДС E , расположенной в ветви ab , равен току I_{ab} в ветви ab , если в ветвь cd переместить ту же ЭДС E .



б) *Принцип линейности.* В линейной цепи при изменении какого-либо из параметров (источника ЭДС, источника тока или сопротивления), любые две величины (токи или напряжения) связаны линейным соотношением вида: $y = ax + b$

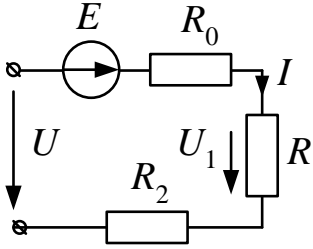
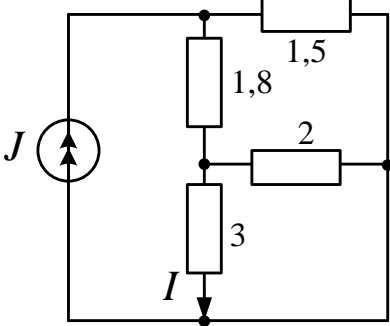
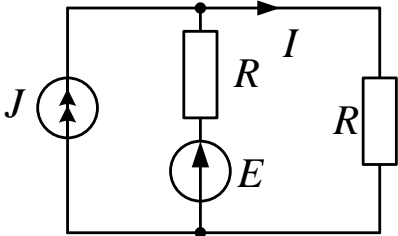
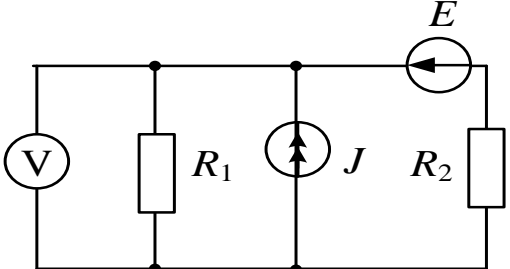
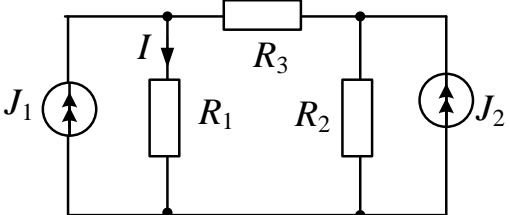
ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

ТЕРМИН	АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК	КИТАЙСКИЙ ЯЗЫК
активное сопротивление (резистор)	resistance	电阻(diàn zǔ)
ветвь	branch	支路(zhī lù)
двухполюсник	two-terminal circuit	二端网络(èr duān wǎng luò)
ёмкость	capacitance	电容(diàn róng)
закон электромагнитной индукции	Faraday's law of magnetic induction	电磁感应(diàn cí gǎn yìng)定律(dìng lǜ)
закон Ома	Ohm's law	欧姆定律(ōu mǔ dìng lǜ)
закон Джоуля-Ленца	Joule's law	焦耳定律(jiāo ěr dìng lǜ)
идеальный независимый источник тока	independent current source	理想(lǐ xiǎng)独立电流源(dú lì diàn liú yuán)
идеальный независимый источник ЭДС	e.m.f. source (electromotive force)	理想(lǐ xiǎng)独立电压源(dú lì diàn yā yuán)
индуктивность	inductance	电感(diàn gǎn), 电感(diàn gǎn)系数(xì shù)
контур	loop	回路(huí lù)
линейная цепь	linear circuit	线性电路(xiàn xìng diàn lù)
магнитное поле	magnetic field	电磁场(diàn cí chǎng)
мощность	power	功率(gōng lǜ)
напряжение	voltage	电压(diàn yā)
параллельное соединение	parallel connection	并联(bìng lián)
переменный ток	alternating current	交流(jiāo liú)
последовательное соединение	series connection	串联(chuàn lián)
постоянный ток	direct current	直流(zhí liú)
потенциал	potential	电位(diàn wèi), 电势(diàn shì)
проводимость	conductance	电导率(diàn dǎo lǜ)
схема	electrical circuit	电路图(diàn lù tú)
узел	node	结(jié)点(diǎn)
электрический ток	electrical current	电(diàn)流(liú)
электрическое поле	electric field	电(diàn)场(chǎng)
электротехника	electrical engineering	电(diàn)工(gōng)学(xué), 电(diàn)工(gōng)技(jì)术(shù)

баланс мощности	power balance	功率(gōng lǜ)平衡(píng héng)
второй закон Кирхгофа	Kirchhoff's voltage law	第二(dì èr)基尔霍夫定律(jī'ěr huò fū dìng lǜ), 基(jī)尔(ěr)霍(huò)负电(fù diàn)压(yā)定律(dìng lǜ)
звезда	wye connection	节点(jié diǎn)
контурный ток	mesh current	回路(huí lù)电流(diàn liú)
короткое замыкание	short-circuit	短路(duǎn lù)
метод законов Кирхгофа	Kirchhoff's laws technique	基尔霍夫定律(jī'ěr huò fū dìng lǜ)方法(fāng fǎ)
метод контурных токов	mesh-current analysis	支路(zhī lù)电流(diàn liú)方法(fāng fǎ)
метод наложения	superposition technique	叠加原理(dié jiā yuán lǐ)
метод узловых потенциалов	nodal-voltage technique	节点(jié diǎn)电压(diàn yā)法(fǎ)
метод преобразований	network analysis by using series and parallel equivalents	变换(biàn huàn)方法(fāng fǎ)
метод эквивалентного генератора	Thevenin and Norton equivalent circuits	电源(diàn yuán)模型(mó xíng)等效(děng xiào)变换(biàn huàn)的方法
нагрузка	load	负载(fù zài)
первый закон Кирхгофа	Kirchhoff's current law	基尔霍夫(jī'ěr huò fū)电流(diàn liú)定律(dìng lǜ)
принцип взаимности	reciprocity principle	相关(xiāng guān)定理(dìng lǐ)
принцип линейности	linearity principle	线性(xiàn xìng)定理(dìng lǐ)
принцип наложения	superposition principle	叠加(dié jiā)原则(yuán zé)
треугольник	delta connection	三角形(sān jiǎo xíng)
холостой ход	open-circuit	断路(duàn lù)
эквивалентное преобразование	equivalent transformation	等效(děng xiào)变换(biàn huàn)

Задачи к теме 1

1	<p>Найти эквивалентное сопротивление относительно зажимов «<i>ab</i>».</p> <p>$R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 28 \text{ Ом}$, $R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 30 \text{ Ом}$.</p>	
2	<p>Найти эквивалентное сопротивление относительно зажимов «<i>ab</i>». Сопротивления на схеме даны в Омах.</p>	
3	<p>С момента $t \geq 0$ напряжение на емкости изменяется по закону $u_C(t) = U_0 e^{\alpha t}$. Определить закон изменения тока.</p>	
4	<p>Определить токи в цепях и указать, для какой из цепей ток определен неправильно?</p>	
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;"> <p>1. </p> <p>$U = 10 \text{ В}$ $E = 20 \text{ В}$ $R = 5 \text{ Ом}$ $I = 2 \text{ А}$</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>2. </p> <p>$U = 10 \text{ В}$ $E = 20 \text{ В}$ $R = 5 \text{ Ом}$ $I = -6 \text{ А}$</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>3. </p> <p>$U = 20 \text{ В}$ $E = 10 \text{ В}$ $R = 5 \text{ Ом}$ $I = 6 \text{ А}$</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>4. </p> <p>$U = 20 \text{ В}$ $E = 20 \text{ В}$ $R = 5 \text{ Ом}$ $I = 8 \text{ А}$</p> </div> </div>		

5	<p>Определить R_0 и падение напряжения на R_2, если $E = 70\text{ В}$, $U = 30\text{ В}$, $R_1 = 10\text{ Ом}$, $R_2 = 38\text{ Ом}$, $U_1 = 20\text{ В}$.</p>	
6	<p>Определить I методом преобразований. Сопротивления на схеме даны в Омах, $J = 30\text{ А}$.</p>	
7	<p>Определить I методом преобразований, если $J = 10\text{ А}$, $E = 10\text{ В}$, $R = 10\text{ Ом}$.</p>	
8	<p>Методом контурных токов определить показание идеального вольтметра, если $J = 10\text{ А}$, $E = 300\text{ В}$, $R_1 = 20\text{ Ом}$, $R_2 = 30\text{ Ом}$.</p>	
9	<p>Определить ток I методом контурных токов, если $J_1 = 100\text{ мА}$, $J_2 = 50\text{ мА}$, $R_1 = 20\text{ Ом}$, $R_2 = 50\text{ Ом}$, $R_3 = 30\text{ Ом}$.</p>	

10	<p>Найти ток I методом узловых потенциалов, если $E_1 = 6 В$, $E_2 = 8 В$, $J = 6 А$. Сопротивления на схеме даны в Омах.</p>	
11	<p>$J_1 = 2 А$, $J_2 = 4 А$, $E = 4 В$, $R_1 = R_2 = R_3 = 4 Ом$, $R_4 = 8 Ом$. Найти ток I_3 а) методом узловых потенциалов; б) методом наложения.</p>	
12	<p>Методом наложения найти ток I_2, если $E_1 = 50 В$, $E_2 = 40 В$, $J = 3 А$, $R_1 = 5 Ом$, $R_2 = 10 Ом$, $R_3 = 8 Ом$.</p>	
13	<p>Определить I методом эквивалентного генератора, если $E_1 = 100 В$, $E_2 = 200 В$, $E_3 = 600 В$. Сопротивления на схеме даны в Омах.</p>	
14	<p>Определить I методом эквивалентного генератора, если $E_1 = 100 В$, $E_2 = 20 В$, $E_3 = 20 В$. Сопротивления на схеме даны в Омах.</p>	

Ответы: 1) 14 Ом; 2) 25 Ом; 3) $i(t) = C\alpha U_0 e^{\alpha t}$ 4) 4; 5) $R_0 = 2$ Ом,
 $U_2 = 76$ В 6) 4 А; 7) 5.5 А; 8) 240 В; 9) 0.105 А; 10) 5.5 А; 11) 1 А;
 12) 7 А; 13) 11.6 А; 14) 6 А.

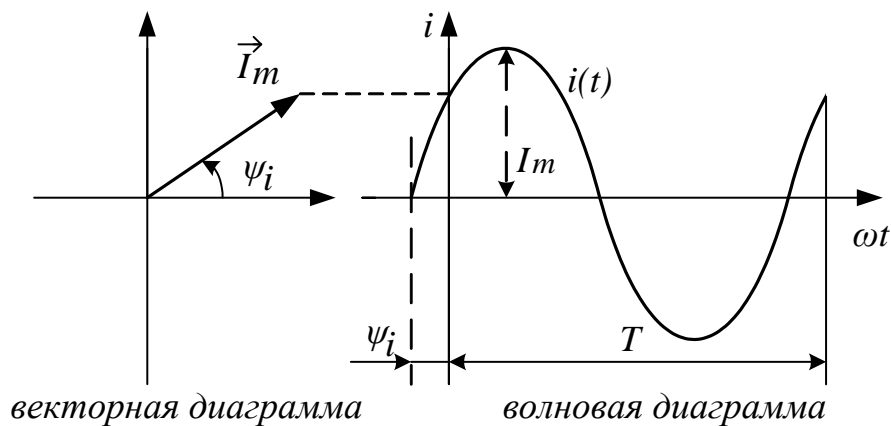
ТЕМА 2. РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ С СИНУСОИДАЛЬНЫМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ТОКАМИ

1. Синусоидальный ток (напряжение) – это величина, мгновенное значение которой меняется по синусоидальному закону. Например, для тока $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, где I_m – амплитудное (максимальное) значение тока; $\omega = 2\pi \cdot f = \frac{2\pi}{T}$, рад/с (радиан/секунду) – угловая частота;

$f = \frac{1}{T}$, Гц (Герц) – частота; T , с (секунда) – период синусоиды;

ψ_i , рад (радиан или градус, π рад = 180°) – начальная фаза.

Векторная диаграмма – это изображение синусоиды в виде вращающегося вектора в прямоугольной системе координат. Длина вектора равна амплитуде синусоиды. Угол поворота вектора равен начальной фазе и отсчитывается от оси абсцисс против часовой стрелки. **Волновая диаграмма** – это график зависимости синусоидального тока от времени.



Действующее значение тока (напряжения):

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = I_m / \sqrt{2}, \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = U_m / \sqrt{2}.$$

2. Резистор в цепи синусоидального тока

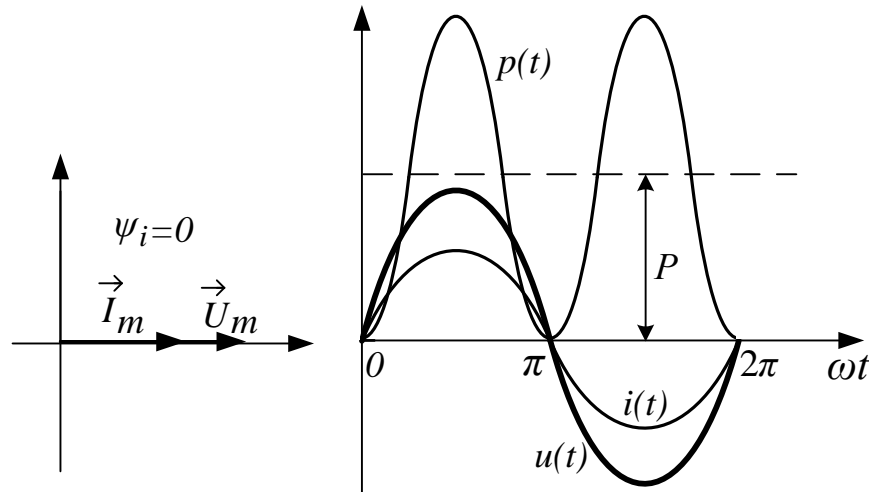
При токе $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$,

по закону Ома $u = iR = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \psi_i)$.

Для действующих значений: $U = IR$. Ток и напряжение в резисторе совпадают по фазе, т.е. угол сдвига фаз $\varphi = 0$.

Мгновенная активная мощность:

$$p = u \cdot i = 2I^2 R \sin^2(\omega t + \psi_i) = I^2 R(1 - \cos 2(\omega t + \psi_i)).$$



Средняя за период T активная мощность: $P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = I^2 R, \text{ Вт}$.

P – называется активной мощностью и используется в балансе активных мощностей.

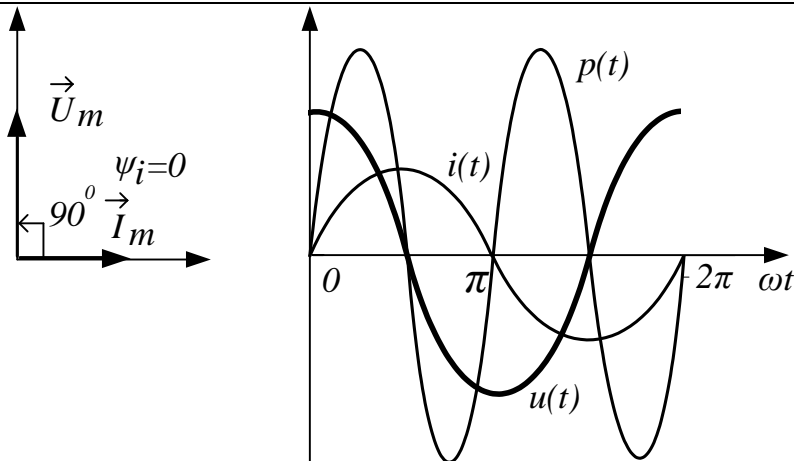
3. Индуктивность в цепи синусоидального тока

При токе $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, по закону электромагнитной индукции:

$$u = L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} I \omega L \cos(\omega t + \psi_i) = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ)$$

Для действующих значений: $U = I \omega L = I X_L$, где $X_L = \omega L, \text{ Ом}$ – индуктивное реактивное сопротивление.

Напряжение на индуктивности опережает ток на 90° , т.е. угол сдвига фаз $\varphi = 90^\circ$.



Мгновенная активная мощность:

$$p = u \cdot i = 2I^2 X_L \sin(\omega t + \psi_i) \cdot \cos(\omega t + \psi_i) = Q_L \sin 2(\omega t + \psi_i),$$

где $Q_L = I^2 X_L$, *вар* (вольт-ампер реактивный) – индуктивная реактивная мощность, применяется в балансе реактивных мощностей.

Средняя за период T активная мощность: $P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = 0$.

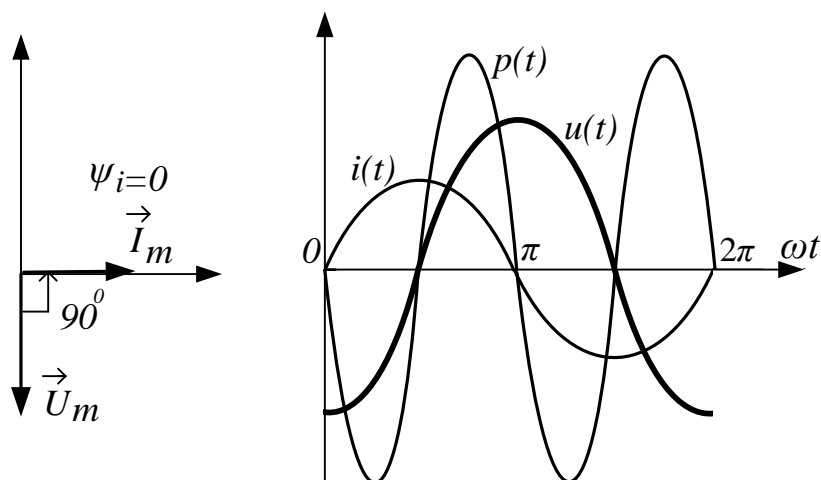
Когда $p \geq 0$ индуктивность запасает энергию в магнитном поле, тогда $p \leq 0$, запасенная энергия возвращается в сеть.

4. Ёмкость в цепи синусоидального тока

При токе $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ для напряжения получим:

$$u = \frac{1}{C} \int i(t) dt = -\sqrt{2} \frac{I}{\omega C} \cos(\omega t + \psi_i) = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ).$$

Для действующих значений: $U = \frac{I}{\omega C} = I X_C$, где $X_C = \frac{1}{\omega C}$, $Ом$ – емкостное реактивное сопротивление. Напряжение на ёмкости отстает от тока на 90° , т.е. угол сдвига фаз $\varphi = -90^\circ$.



Мгновенная активная мощность:

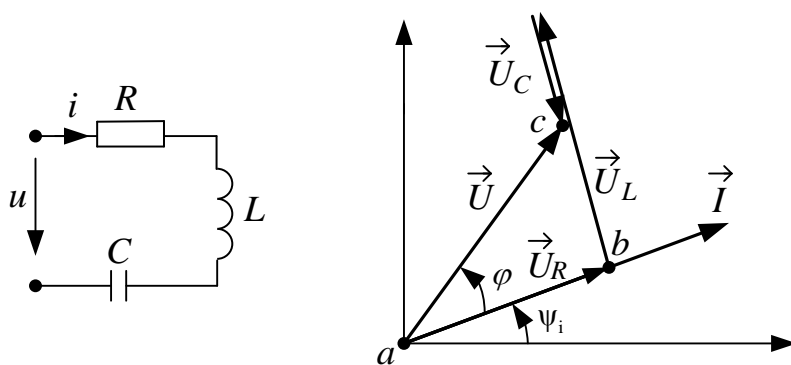
$$p = u \cdot i = -2I^2 X_C \sin(\omega t + \psi_i) \cdot \cos(\omega t + \psi_i) = Q_C \sin 2(\omega t + \psi_i),$$

где $Q_C = -I^2 X_C$, *вар* – емкостная реактивная мощность, применяется в балансе реактивных мощностей.

Средняя за период T активная мощность: $P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = 0$.

Когда $p \geq 0$ ёмкость запасает энергию в электрическом поле, $p \leq 0$, запасенная энергия возвращается в сеть.

5. Последовательное соединение R, L, C



При токе $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \psi_i)$, по 2 закону Кирхгофа входное напряжение равно: $u = u_R + u_L + u_C$.

Построим векторную диаграмму для действующих значений тока и напряжений.

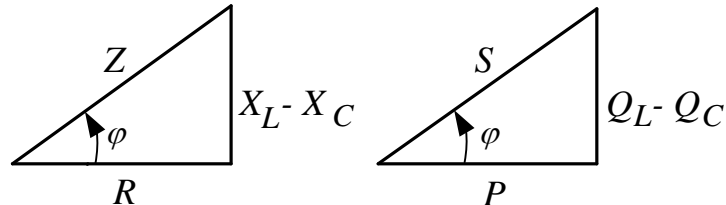
Получим треугольник напряжений abc , где $U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$ – действующее значение входного напряжения,

$\varphi = \arctg \frac{U_L - U_C}{U_R}$ – сдвиг фазы между входным напряжением и током

(угол нагрузки),

$u = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \psi_i + \varphi)$ – мгновенное значение входного напряжения.

На основании треугольника напряжений получаем треугольник сопротивлений и треугольник мощностей:



Из треугольника сопротивлений:

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R},$$

где Z (Ом) – полное сопротивление цепи.

Из треугольника мощностей:

$$S = UI = \sqrt{P^2 + (Q_L - Q_C)^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{Q_L - Q_C}{P},$$

где S, VA (вольт-ампер) – полная мощность цепи;

$\cos \varphi = \frac{P}{S}$ – коэффициент мощности.

На основании треугольника мощностей составляется баланс мощности электрической цепи.

а) мощность источников: $S_{\text{и}} = UI$, $P_{\text{и}} = S \cos \varphi$, $Q_{\text{и}} = S \sin \varphi$.

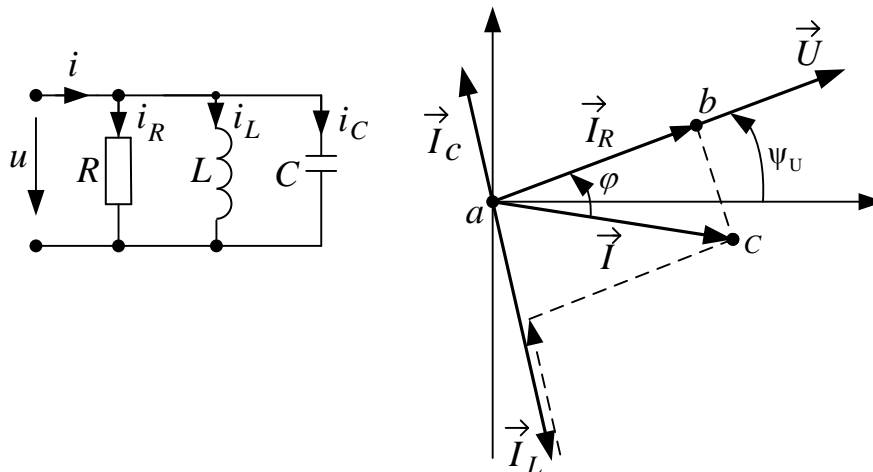
б) потребляемая мощность:

$$P_{\text{п}} = I^2 R, \quad Q_{\text{п}} = I^2 X_L - I^2 X_C, \quad S_{\text{п}} = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Погрешность расчета (небаланс):

$$\delta_P = \frac{|P_{\text{и}} - P_{\text{п}}|}{P_{\text{и}}} \cdot 100\% \leq 3\%, \quad \delta_Q = \frac{|Q_{\text{и}} - Q_{\text{п}}|}{Q_{\text{и}}} \cdot 100\% \leq 3\%$$

6. Параллельное соединение R, L, C .



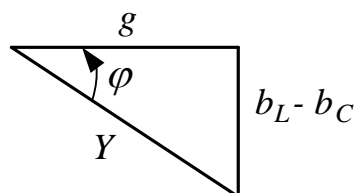
При напряжении $u = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \psi_u)$, по 1 закону Кирхгофа входной ток равен: $i = i_R + i_L + i_C$. Построим векторную диаграмму для действующих значений напряжения токов. Получим треугольник токов abc, где $I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$ – действующее значение входного тока,

$\varphi = \arctg \frac{I_L - I_C}{I_R}$ – сдвиг фазы между входным напряжением и током

(угол нагрузки).

$i = \sqrt{2} I \sin(\omega t + \psi_u - \varphi)$ – мгновенное значение входного тока.

На основании треугольника токов получаем треугольник проводимостей.



Из треугольника проводимостей:

$$Y = \frac{I}{U} = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{b_L - b_C}{g},$$

где $Y, Cм$ (Сименс) – полная проводимость цепи;

$g = \frac{1}{R}, Cм$ – активная проводимость;

$b_L = \frac{1}{X_L}, Cм$ – индуктивная реактивная проводимость;

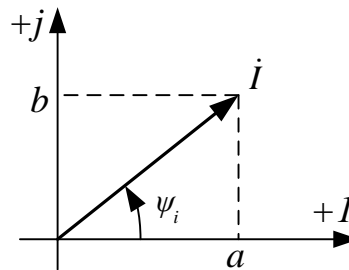
$b_C = \frac{1}{X_C}, Cм$ – емкостная реактивная проводимость.

7. Изображение синусоидальных токов и напряжений комплексными числами.

Синусоидальной функции времени напряжения или тока соответствует изображение в виде комплексного числа (КЧ) на комплексной плоскости.

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \psi_i) \leftrightarrow \dot{I} = Ie^{j\psi_i} = a + jb,$$

где $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; \dot{I} – комплекс действующего значения тока; $Ie^{j\psi_i}$ – показательная форма записи КЧ; $a + jb$ – алгебраическая форма записи КЧ; $a = \operatorname{Re}(Ie^{j\psi_i})$ – действительная часть КЧ; $b = \operatorname{Im}(Ie^{j\psi_i})$ – мнимая часть КЧ.



Система координат $(+j, +I)$ называется комплексной плоскостью.

$(+I)$ – действительная ось, $(+j)$ – мнимая ось.

Обе формы КЧ связаны тригонометрическими соотношениями:

$$a = I \cos \psi_i, \quad b = I \sin \psi_i, \quad I = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad \psi_i = \operatorname{arctg} \frac{b}{a} \pm 180^0,$$

причем $(\pm 180^0)$ учитывается, когда $a \leq 0$.

Операции с комплексными числами

1) сложение и вычитание:

$$\dot{A}_1 \pm \dot{A}_2 = (a_1 + jb_1) \pm (a_2 + jb_2) = (a_1 \pm a_2) + (b_1 \pm b_2) = a_3 + jb_3 = \dot{A}_3$$

2) умножение:

$$\dot{A}_1 \dot{A}_2 = A_1 e^{j\psi_1} \cdot A_2 e^{j\psi_2} = A_1 A_2 e^{j(\psi_1 + \psi_2)} = A_3 e^{j\psi_3} = \dot{A}_3$$

3) деление: $\frac{\dot{A}_1}{\dot{A}_2} = \frac{A_1 e^{j\psi_1}}{A_2 e^{j\psi_2}} = \frac{A_1}{A_2} e^{j(\psi_1 - \psi_2)} = A_3 e^{j\psi_3} = \dot{A}_3$

4) возведение в степень: $(Ae^{j\psi})^n = A^n e^{j\psi \cdot n}$

5) извлечение корня: $\sqrt[n]{Ae^{j\psi}} = \sqrt[n]{A} e^{j\frac{\psi}{n}}$

6) комплексно-сопряжённое число \dot{A}^* : если $\dot{A} = Ae^{j\psi} = a + jb$, то

$$\dot{A}^* = A e^{-j\psi} = a - jb$$

7) некоторые соотношения:

$$j = e^{j90^0}; (-j) = e^{-j90^0}; 1 = e^{j0^0}; (-1) = e^{j180^0}; \frac{1}{j} = -j; j^2 = -1$$

8) дифференцирование:

т.к. $(\sqrt{2}A \sin(\omega t + \psi))' = (\sqrt{2}\omega A \sin(\omega t + \psi + 90^0))$, то

$$(A e^{j\psi})' = \omega A e^{j(\psi+90^0)} = j\omega \dot{A}$$

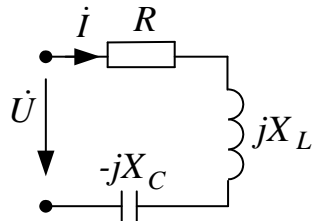
9) интегрирование:

т.к. $\int \sqrt{2} A \sin(\omega t + \psi_i) dt = \sqrt{2} \frac{A}{\omega} \sin(\omega t + \psi_i - 90^0)$, то

$$\int A e^{j\psi} dt = \frac{A}{\omega} e^{j(\psi-90^0)} = \frac{\dot{A}}{j\omega} = -j \frac{\dot{A}}{\omega}$$

8. Законы электротехники в комплексной форме:

а) закон Ома. При токе $i = \sqrt{2}I \sin(\omega t + \psi_i)$, в комплексной форме получим изображения действующих значений тока и напряжений на элементах: $\dot{I} = I e^{j\psi_i}$, $\dot{U}_R = \dot{I}R$, $\dot{U}_L = \dot{I}jX_L$, $\dot{U}_C = \dot{I}(-jX_C)$.

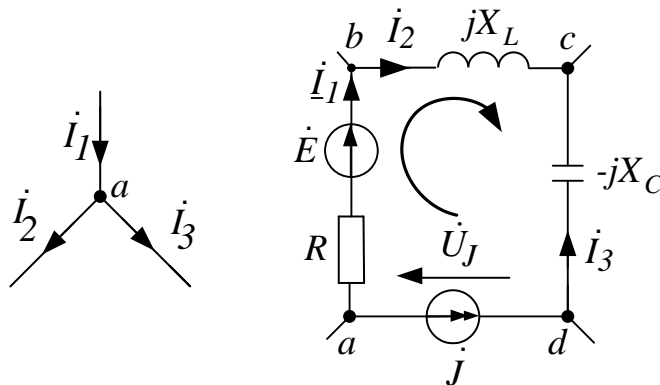


Полное комплексное сопротивление цепи:

$$\underline{Z} = R + jX_L - jX_C = Z e^{j\varphi}$$

Входное напряжение: $\dot{U} = \dot{I}Z = U e^{j(\psi_i + \varphi)} = U e^{j\psi_u}$.

б) первый закон Кирхгофа: $\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0$.



г) второй закон Кирхгофа: $\dot{U}_R + \dot{U}_L - \dot{U}_C + \dot{U}_J = \dot{E}$ или

$$\dot{I}_1 R + \dot{I}_2 jX_L - \dot{I}_3(-jX_C) + \dot{U}_J = \dot{E}.$$

9. Баланс мощности в комплексной форме

мощность источников:

$$\dot{S}_{\text{и}} = \sum \dot{E} \cdot \dot{I}^* + \sum \dot{U}_J \cdot \dot{J}^* = S e^{j\varphi} = S \cos \varphi + j S \sin \varphi = P_{\text{и}} + j Q_{\text{и}}$$

активная потребляемая мощность: $P_{\text{п}} = \sum I^2 R$

реактивная потребляемая мощность: $Q_{\text{п}} = \sum I^2 X_L - \sum I^2 X_C$

погрешность расчета (небаланс):

$$\delta_P = \frac{|P_{\text{и}} - P_{\text{п}}|}{P_{\text{и}}} \cdot 100\% \leq 3\%, \quad \delta_Q = \frac{|Q_{\text{и}} - Q_{\text{п}}|}{Q_{\text{и}}} \cdot 100\% \leq 3\%$$

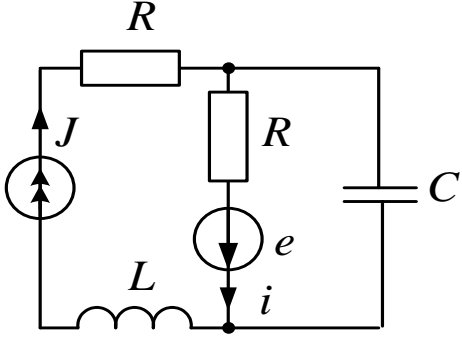
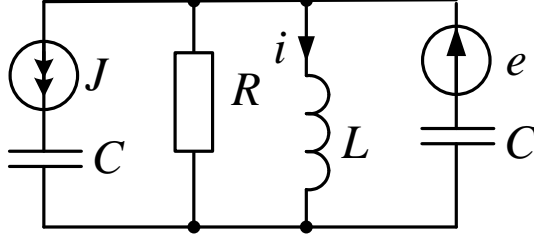
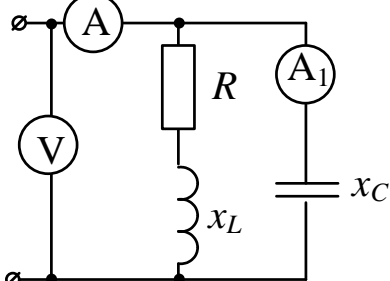
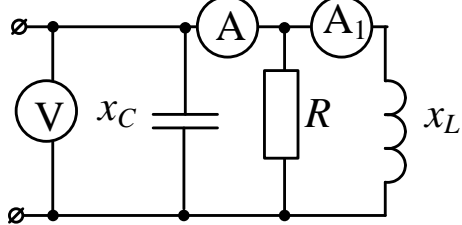
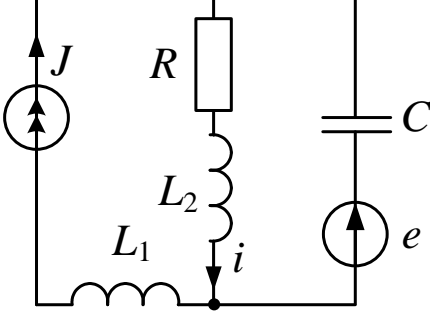
ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

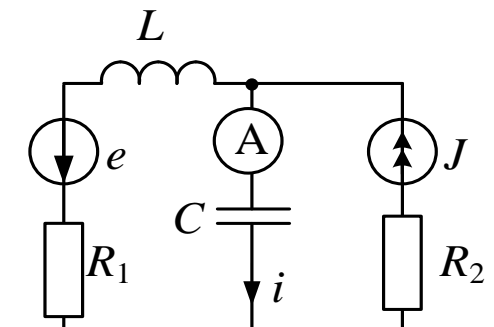
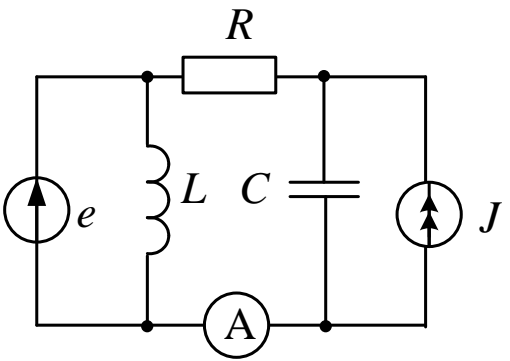
ТЕРМИН	АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК	КИТАЙСКИЙ ЯЗЫК
активная мощность	active power	有功功率(yǒu gōng gōng lǜ)
активная проводимость	conductance	有效(yǒu xiào)电导率(diàn dǎo lǜ)
активное сопротивление	resistance	电阻(diàn zǔ)
алгебраическая форма	rectangular form	代数(dài shù)形式(xíng shì)
амплитуда	amplitude	振幅(zhèn fú)
вектор	vector	向量(xiàng liàng)
векторная диаграмма	vector diagram phasor diagram	向量(xiàng liàng)图(tú)
волновая диаграмма	waveform	波形(bō xíng)图(tú)
действительная ось	axis of real numbers	实轴(shí zhóu)
действующее значение	root-mean-square value (rms), effective value	实数(shí shù)
емкостное сопротивление	capacitive reactance	电容(diàn róng)
индуктивное сопротивление	inductive reactance	电感(diàn gǎn)
комплексная плоскость	complex plane	复平面(fù píng miàn)
комплексное число	complex number	复数(fù shù)
комплексно-	complex conjugate	复(fù)共轭(gòng è)

сопряжённое число		
мгновенное значение	instantaneous value	瞬时值(shùn shí zhí)
мнимая ось	axis of imaginary numbers	虚轴(xū zhóu)
модуль	magnitude	模数(mó shù)
начальная фаза	phase angle	初始(chū shǐ)相位(xiàng wèi)
период	cycle, period	周期(zhōu qī)
погрешность расчета	limit of error accuracy	计算(jì suàn)误差(wù chā)
показательная форма	exponential form	指数(zhǐ shù)形式(xíng shì)
полная мощность	apparent power	总(zǒng)功率(gōng lǜ)
полная проводимость	total conductance or admittance	总(zǒng)电导率(diàn dǎo lǜ)
полное сопротивление	impedance (complex)	总(zǒng)电阻(diàn zǔ)
реактивная мощность	reactive power	无功功率(wú gōng gōng lǜ)
реактивная проводимость	susceptance	无效(wú xiào)电导率(diàn dǎo lǜ)
реактивное сопротивление	reactance	无效(wú xiào)阻抗(zǔ kàng)
сдвиг фазы	phase shift	相移(xiàng yí)
синусоидальный ток	sinusoidal current	正弦(zhèng xián)电流(diàn liú)
треугольник мощностей	power triangle	功率(gōng lǜ)三角形(sān jiǎo xíng)
треугольник напряжений	voltage triangle	电压(diàn yā)三角形(sān jiǎo xíng)
треугольник сопротивлений	load impedance triangle	电阻(diàn zǔ)三角形(sān jiǎo xíng)
фаза	phase	相位(xiàng wèi)
частота	frequency	频率(pín lǜ)

Задачи к теме 2

<p>1</p>	<p>$u(t) = 71.4 \sin(\omega t - 90^\circ)$, В; $R_1 = 10 \text{ Ом}$; $R_2 = 30 \text{ Ом}$; $R_3 = 40 \text{ Ом}$; $x_2 = 40 \text{ Ом}$; $x_3 = 30 \text{ Ом}$; $x_4 = 60 \text{ Ом}$; $x_5 = 60 \text{ Ом}$. Определить амплитудное значение входного тока и общее сопротивление цепи.</p>	
<p>2</p>	<p>$J(t) = 5.65 \sin(\omega t + 30^\circ)$ А; $R_1 = 4 \text{ Ом}$; $R_2 = 3 \text{ Ом}$; $x_1 = 3 \text{ Ом}$; $x_2 = 4 \text{ Ом}$; $x_3 = 4 \text{ Ом}$. Определить амплитудное значение напряжения на источнике тока и общее сопротивление цепи.</p>	
<p>3</p>	<p>$e(t) = 11.3 \sin(\omega t + 90^\circ)$ В; $J(t) = 5.65 \sin \omega t$ А; $f = 1.595 \cdot 10^6$ Гц; $L_1 = 10^{-6}$ Гн; $L_2 = 0.4 \cdot 10^{-6}$ Гн $C = 16.6 \cdot 10^{-9}$ Ф; $R = 2 \text{ Ом}$. Определить i методом контурных токов</p>	
<p>4</p>	<p>$J(t) = 2.82 \sin \omega t$ А; $f = 15950$ Гц; $L = 80 \text{ мкГн}$; $C = 2.5 \text{ мкФ}$; $R = 4 \text{ Ом}$. Определить показание амперметра методом контурных токов.</p>	

5	$e(t) = 5.657 \sin(\omega t + 90^\circ) \text{ B};$ $J(t) = 2.82 \sin \omega t \text{ A};$ $f = 1595 \text{ Гц};$ $L = 0.2 \text{ мГн}; C = 50 \text{ мкФ};$ $R = 2 \text{ Ом}.$ Определить i методом узловых потенциалов.	
6	$e(t) = 141 \sin \omega t \text{ B};$ $J(t) = 7.07 \sin(\omega t - 90^\circ) \text{ A};$ $f = 318.5 \text{ Гц}; L = 10 \text{ мГн};$ $C = 25 \text{ мкФ}; R = 20 \text{ Ом}.$ Определить амплитудное значение тока i методом узловых потенциалов.	
7	Показания приборов: $V = 282 \text{ B},$ $A = A_1 = 1 \text{ A}, R = x_L.$ Определить $x_L.$	
8	Показания приборов: $A_1 = 8 \text{ A},$ $A = 10 \text{ A}, R = 10 \text{ Ом}, x_L = x_C$ Определить показание вольтметра.	
9	$e(t) = 22.62 \sin(\omega t + 180^\circ) \text{ B};$ $J(t) = 7.97 \sin(\omega t + 45^\circ) \text{ A};$ $f = 159.5 \text{ Гц}; L_1 = 8 \text{ мГн};$ $L_2 = 2 \text{ мГн}; C = 500 \text{ мкФ};$ $R = 4 \text{ Ом}.$ Определить i методом эквивалентного генератора.	

10	$e(t) = 11.31 \sin(\omega t + 90^\circ) \text{ В};$ $J(t) = 5.657 \sin(\omega t + 90^\circ) \text{ А};$ $f = 15.95 \text{ кГц}; L = 20 \text{ мкГн};$ $C = 5 \text{ мкФ}; R_1 = R_2 = 2 \text{ Ом}.$ Определить показание амперметра и i методом эквивалентного генератора.	
11	$e(t) = 14.1 \sin(\omega t + 180^\circ) \text{ В};$ $J(t) = 0.3535 \sin(\omega t - 53.13^\circ) \text{ А};$ $f = 159.5 \text{ кГц}; L = 10 \text{ мкГн}$ $C = 0.125 \text{ мкФ}; R = 6 \text{ Ом}.$ Определить показание амперметра методом наложения.	
Ответы: 1) $\underline{Z} = 28 + j42 = 50.47 e^{j56.3^\circ} \text{ Ом}, I_m = 1.42 \text{ А};$ 2) $\underline{Z} = 3.5 + j3.5 = 4.93 e^{j45^\circ} \text{ Ом}, U_{Jm} = 27.8 \text{ В};$ 3) $i(t) = 6.32 \sin(\omega t - 153^\circ) \text{ А};$ 4) 3.14 А; 5) 0 А; 6) 14.1 А; 7) 141 Ом; 8) 60 В; 9) $i(t) = 4 \sin(\omega t - 135^\circ) \text{ А};$ 10) 4 А, $i(t) = 5.64 \sin(\omega t + 180^\circ) \text{ А};$ 11) 0.846 А.		

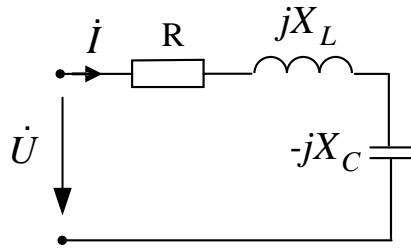
ТЕМА 3. РЕЗОНАНС В ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Резонанс – это такой режим электрической цепи, содержащей емкости и индуктивности, при котором общее входное сопротивление или входная проводимость цепи будут вещественными числами. В этом режиме цепь потребляет только активную мощность и входные ток и напряжение совпадают по фазе.

1. Резонанс напряжений – это резонанс при последовательном соединении участков цепи с индуктивным и емкостным характером

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C).$$

Условие резонанса: $X_L = X_C$ или $\omega L = 1/\omega C$.

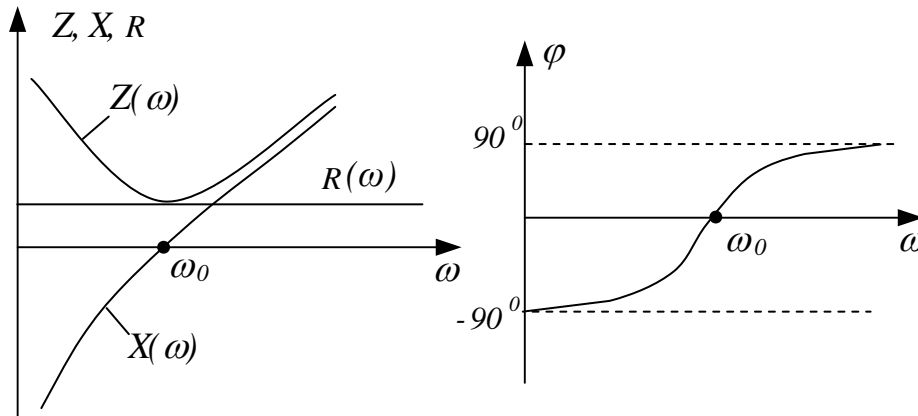


Резонансные величины: $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$; $C_0 = 1/\omega^2 L$; $L_0 = 1/\omega^2 C$.

В режиме резонанса $\underline{Z} = R$; $\dot{I} = \dot{I}_{\max} = \dot{U}/R$; $\varphi = \text{arctg} \frac{X_L - X_C}{R} = 0$;

$Q = UI \sin \varphi = 0$; $S = P = UI \cos \varphi = I^2 R$.

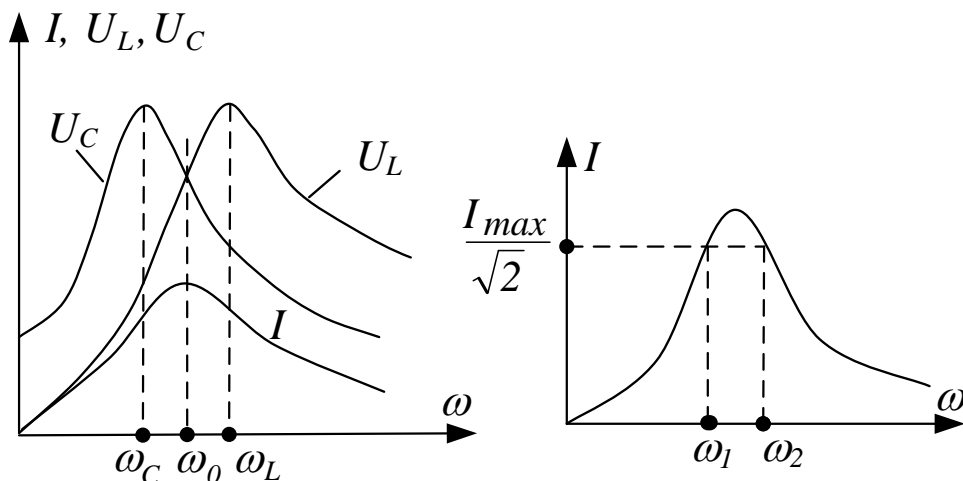
Зависимости $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$, $X = \omega L - 1/\omega C$ и $\varphi = \text{arctg} \frac{X}{R}$ от угловой частоты ω :



Если $X_L = X_C > R$, то $\dot{U}_L = jX_L \dot{I}$, $\dot{U}_C = -jX_C \dot{I}$ будут равны по модулю и превысят входное напряжение $U_L = U_C > U$.

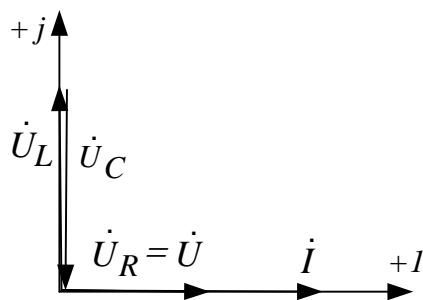
$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$ [Ом] – **волновое** (характеристическое) сопротивление контура;

$G = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\rho}{R}$ – **добротность** контура, которая определяет резонансные свойства контура. Чем больше добротность G , тем меньше отличаются ω_L и ω_C от резонансной частоты и тем острее становятся все три резонансные кривые $I(\omega)$, $U_C(\omega)$, $U_L(\omega)$.

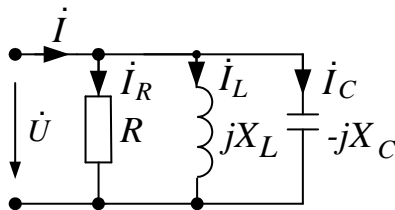


Полоса пропускания $\Pi_\omega = |\omega_1 - \omega_2| = \frac{\omega_0}{G}$ определяется по уровню $I_{\max}/\sqrt{2}$ резонансной кривой тока $I(\omega)$.

Векторная диаграмма резонанса напряжений



2. Резонанс токов – это резонанс при параллельном соединении участков цепи с индуктивным и емкостным характером.



$$\dot{i}_R = \frac{\dot{U}}{R} = g\dot{U}; \quad \dot{i}_L = \frac{\dot{U}}{jX_L} = -\dot{U}jb_L; \quad \dot{i}_C = \frac{\dot{U}}{-jX_C} = \dot{U}jb_C,$$

где $g = \frac{1}{R}$; $b_L = \frac{1}{X_L}$; $b_C = \frac{1}{X_C}$.

$$\dot{i} = \dot{i}_R + \dot{i}_C + \dot{i}_L = \dot{U}(g + j(b_C - b_L)) = \dot{U}\underline{Y},$$

где $\underline{Y} = g + j(b_C - b_L)$ – комплекс полной проводимости цепи.

Условие резонанса токов: $b_L = b_C$ или $1/\omega L = \omega C$.

Резонансные величины: $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$; $C_0 = 1/\omega^2 L$; $L_0 = 1/\omega^2 C$.

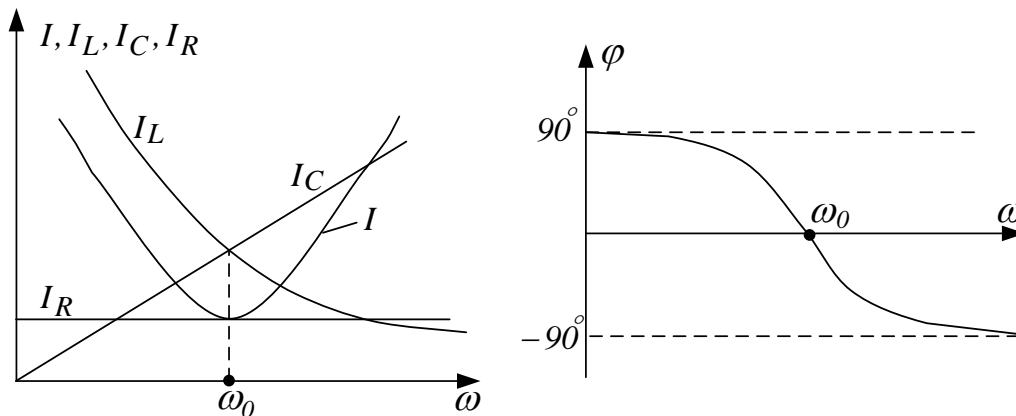
В режиме резонанса токов проводимость $\underline{Y} = 1/R$ и входной ток будут минимальны; $\varphi = \text{arctg} \frac{b_C - b_L}{g} = 0$; $Q = UI \sin \varphi = 0$;

$$S = P = UI \cos \varphi = I_R^2 R.$$

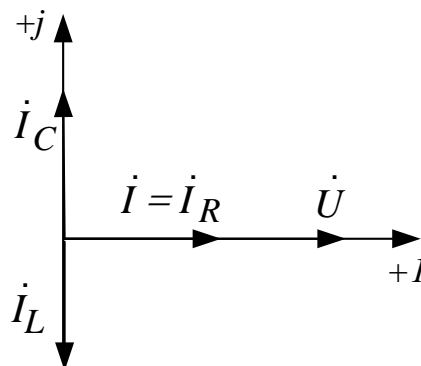
Если $g < \omega_0 C = \frac{1}{\omega_0 L}$, то $I_L = I_C > I$; $y = \sqrt{\frac{C}{L}}$ – волновая проводимость

контура; $G = \frac{I_L}{I} = \frac{I_C}{I} = \frac{y}{g}$ – добротность контура.

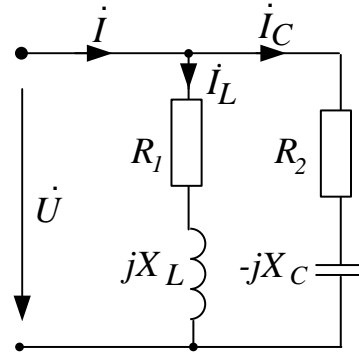
Частотные характеристики



Векторная диаграмма при резонансе токов



3. Резонанс токов в параллельном контуре с потерями



$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{R_1 + jX_L}; \quad \underline{Y}_2 = \frac{1}{R_2 - jX_C}; \quad \underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = \frac{1}{R_1 + jX_L} + \frac{1}{R_2 - jX_C}$$

По условию резонанса мнимая часть полной проводимости цепи должна равняться нулю. Чтобы выделить мнимую часть умножим числитель и знаменатель на комплексно сопряженные числа:

$$\frac{R_1 - jX_L}{R_1^2 + X_L^2} + \frac{R_2 + jX_C}{R_2^2 + X_C^2} = \left(\frac{R_1}{R_1^2 + X_L^2} + \frac{R_2}{R_2^2 + X_C^2} \right) + j \left(\frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2} - \frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2} \right).$$

Приравняв к нулю мнимую часть, находим условие резонанса в параллельном контуре с потерями:

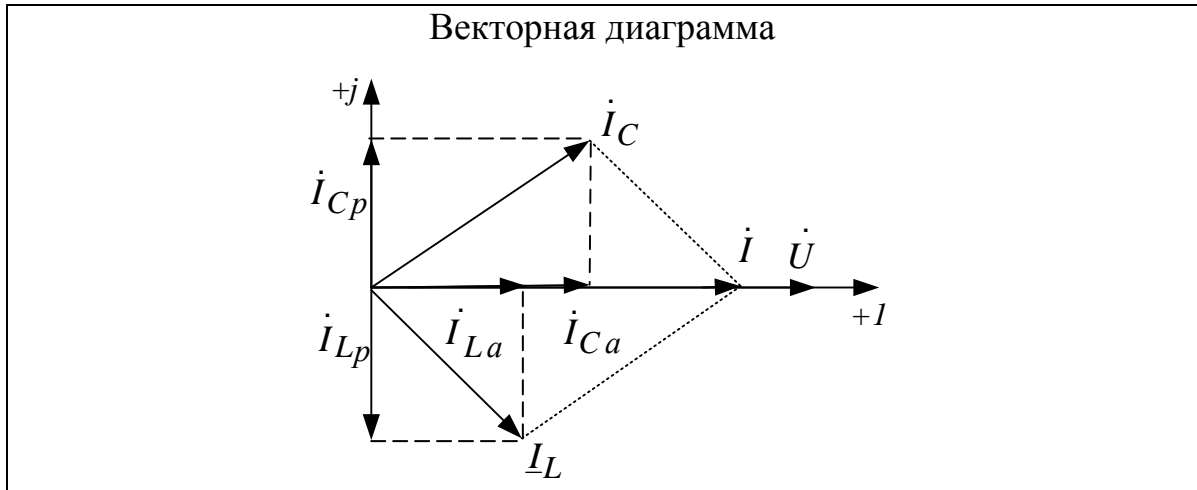
$$\frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2} = \frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2}.$$

Из этого выражения находим резонансную частоту:

$$\omega_p = \omega_0 \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}}, \quad \text{где } \omega_0 = 1/\sqrt{LC}; \quad \rho = \sqrt{L/C}.$$

При $\dot{U} = Ue^{j0}$, токи в параллельных ветвях $\dot{I}_L = \frac{\dot{U}}{R_1 + jX_L} = I_{La} - jI_{Lp}$;

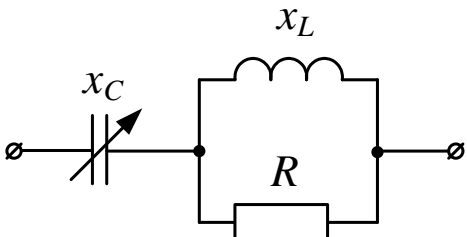
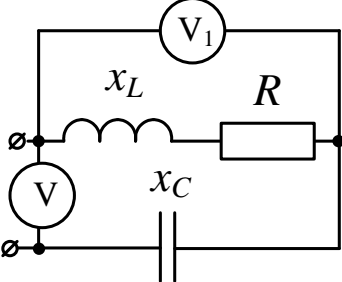
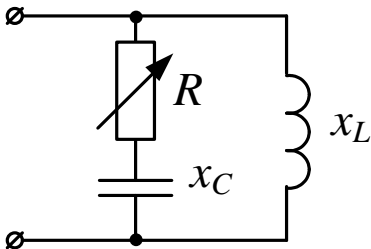
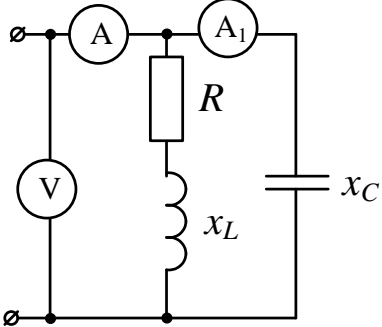
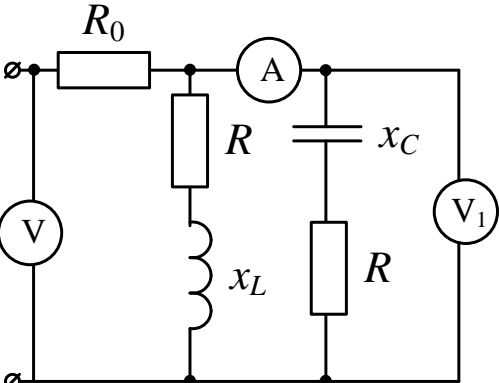
$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}}{R_2 - jX_C} = I_{Ca} + jI_{Cp}.$$



ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

ТЕРМИН	АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК	КИТАЙСКИЙ ЯЗЫК
волновая проводимость	characteristic circuit conductance	波形(bō xíng)电导率(diàn dǎo lǜ)
волновое сопротивление	characteristic circuit impedance	波形(bō xíng)阻抗(zǔkàng)
добротность	Q-factor	品质因数(pǐn zhì yīn shù)
полоса пропускания	bandwidth	透过(tòu guò)区域(qū yù)
резонанс	resonance	共振(gòng zhèn)
резонанс напряжений	series resonance or acceptor resonance	电压(diàn yā)共振(gòng zhèn)
резонанс токов	parallel resonance or rejector resonance	电流(diàn liú)共振(gòng zhèn)
резонансная частота	resonant frequency	共振频率(gòng zhèn pín lǜ)
резонансный контур	resonant loop	振荡(zhèn dòng)回路(huí lù)

Задачи к теме 3

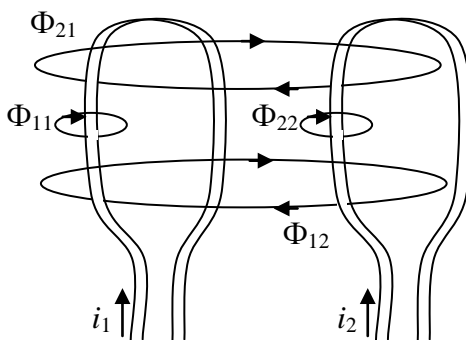
1	<p>$x_L = 4 \text{ Ом}, R = 4 \text{ Ом}.$ Определить величину x_C, при которой в цепи наступит резонанс.</p>	
2	<p>Показания приборов в режи- ме резонанса: $V=6 \text{ В},$ $V_1=10 \text{ В}.$ Определить добротность контура.</p>	
3	<p>При каком значении R в це- пи наступит резонанс, если $x_L = 12.5 \text{ Ом}, x_C = 8 \text{ Ом}?$</p>	
4	<p>Показания приборов в режи- ме резонанса: $A=5 \text{ А},$ $A_1=8.66 \text{ А}.$ Определить входное напря- жение, если $R = 5 \text{ Ом}.$</p>	
5	<p>Показания приборов в режи- ме резонанса: $A=1 \text{ А}, V_1=50 \text{ В}$ Определить входное напря- жение, если $R = x_L = x_C,$ $R_0 = 35.4 \text{ Ом}.$</p>	
<p>Ответы: 1) 2 Ом; 2) 1.33; 3) 6 Ом; 4) 100 В; 5) 100 В</p>		

ТЕМА 4. РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

1. При наличии в цепи катушек, взаимодействующих своими магнитными потоками, цепь называют **индуктивно связанной** или **цепью с взаимной индуктивностью**.

2. **Явление взаимоиндукции** – это возникновение ЭДС в каком-либо контуре при изменении тока в другом контуре.

Магнитный поток Φ_1 , Вб (Вебер) первого контура (создается i_1) частично замыкается вокруг витков первого контура, создавая поток рассеяния Φ_{11} , и частично проходит через витки второго контура, создавая поток взаимной индукции) Φ_{21} : $\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{21}$.



Магнитный поток Φ_2 второго контура (создается i_2) частично замыкается вокруг витков второго контура, создавая поток рассеяния Φ_{22} , и частично проходит через витки первого контура, создавая поток взаимной индукции Φ_{12} : $\Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{12}$.

Потокосцепление первого контура

$$\psi_1 = w_1(\Phi_1 \pm \Phi_{12}),$$

потокосцепление второго контура

$$\psi_2 = w_2(\Phi_2 \pm \Phi_{21}), \text{ где}$$

w_1, w_2 – число витков первого и второго контуров.

$L_1 = \frac{w_1 \Phi_{11}}{i_1}$; $L_2 = \frac{w_2 \Phi_{22}}{i_2}$, Гн (Генри) – собственные индуктивности кон-

туров; $M_{12} = \frac{w_1 \Phi_{12}}{i_2}$; $M_{21} = \frac{w_2 \Phi_{21}}{i_1}$, Гн – взаимные индуктивности.

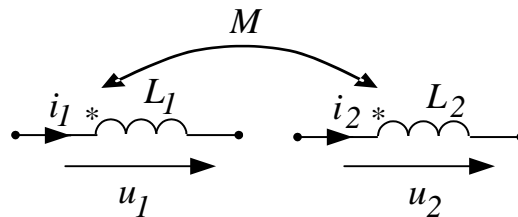
Для линейных цепей $\Phi_{21} = \Phi_{12}$; $M_{12} = M_{21} = M$.

3. **Степень магнитной связи** двух катушек характеризуется **коэффи-**

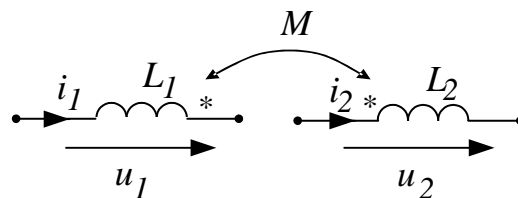
коэффициентом связи $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$.

4. Индуктивно связанные катушки помечают стрелками и указывают их одноименные зажимы.

При **согласном включении** потоки взаимной индукции Φ_{21} и Φ_{12} совпадают по направлению. При этом токи направлены одинаковым образом относительно одноименных зажимов:



При **встречном включении** взаимные магнитные потоки Φ_{21} и Φ_{12} направлены навстречу друг другу. При этом токи направлены различным образом относительно одноименных зажимов:



5. Мгновенное значение напряжения на индуктивно связанных катушках:

$$u_1 = w_1 \frac{d(\Phi_{11} \pm \Phi_{12})}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt};$$

$$u_2 = w_2 \frac{d(\Phi_{22} \pm \Phi_{21})}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt},$$

знак «+» берется при согласном включении катушек, а «-» – при встречном включении.

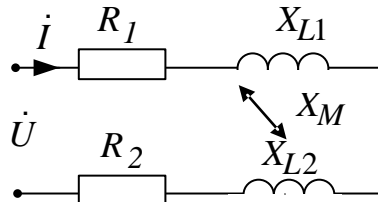
6. Комплексы действующих значений напряжений на катушках

$\dot{U}_1 = \dot{U}_{L1} \pm \dot{U}_{M1} = jX_{L1} \dot{I}_1 \pm jX_M \dot{I}_2$; $\dot{U}_2 = \dot{U}_{L2} \pm \dot{U}_{M2} = jX_{L2} \dot{I}_2 \pm jX_M \dot{I}_1$,
где $X_{L1} = \omega L_1$; $X_{L2} = \omega L_2$; $X_M = \omega M$, ωM – реактивное сопротивление индуктивной связи; $\dot{U}_{M1} = jX_M \dot{I}_2$, $\dot{U}_{M2} = jX_M \dot{I}_1$ – комплексные напряжения взаимной индукции.

При согласном включении берется знак «+» и вектора \dot{U}_{M1} и \dot{U}_{M2} опережают свои токи \dot{I}_2 и \dot{I}_1 на 90° (индуктивный характер), а при встречном включении берется знак «-», и вектора \dot{U}_{M1} и \dot{U}_{M2} отстают от своих токов на 90° (емкостной характер).

При расчете цепи по уравнениям Кирхгофа напряжение $\dot{U}_M = \pm j\omega MI$ учитывается наравне с другими падениями напряжения с учетом вида включения (согласное или встречное).

7. Последовательное соединение катушек



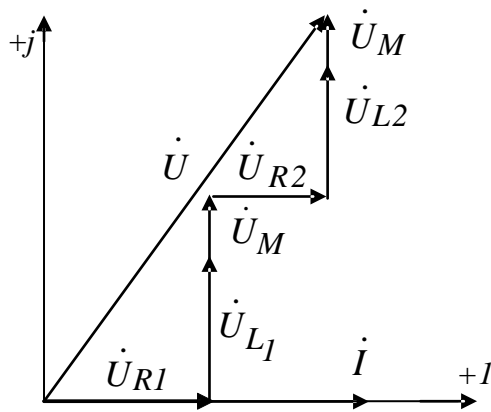
$$\begin{aligned} \dot{U}_{R1} &= iR_1; \quad \dot{U}_{R2} = iR_2; \quad \dot{U}_1 = jX_{L1}i \pm jX_M i = \dot{U}_{L1} \pm \dot{U}_M; \\ \dot{U}_2 &= jX_{L2}i \pm jX_M i = \dot{U}_{L2} \pm \dot{U}_M. \\ \underline{Z} &= R_1 + R_2 + j(X_{L1} + X_{L2} \pm 2X_M). \end{aligned}$$

Общий ток $i = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{\dot{U}}{R_1 + R_2 + j(X_{L1} + X_{L2} \pm 2X_M)}$,

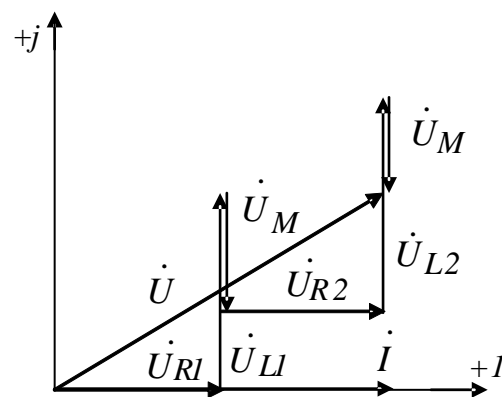
«+» – при согласном включении; «-» – при встречном.

При неизменном действующем значении входного напряжения больший по величине ток будет при встречном включении.

Векторные диаграммы



согласное включение

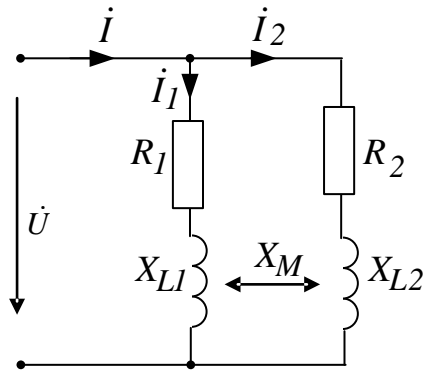


встречное включение

8. Параллельное соединение катушек

Уравнения по законам Кирхгофа в комплексной форме с учетом влияния индуктивной связи:

$$i = i_1 + i_2; \quad \dot{U} = i_1 R_1 + jX_{L1} i_1 \pm jX_M i_2; \quad \dot{U} = i_2 R_2 + jX_{L2} i_2 \pm jX_M i_1.$$



Совместное решение уравнений позволяет определить ток:

$$i = \dot{U} \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2(\pm jX_M)}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + X_M^2},$$

где $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{L1}$; $\underline{Z}_2 = R_2 + jX_{L2}$, при этом знак «+» берется при согласном включении катушек, а «-» – при встречном.

При неизменном входном напряжении больший ток будет при встречном включении.

9. При составлении уравнений по законам Кирхгофа необходимо помнить следующее правило: если в схеме согласное включение катушек, то напряжение самоиндукции \dot{U}_L и напряжение взаимоиндукции \dot{U}_M одной катушки будут иметь одинаковые знаки, а при встречном – разные.

При расчете цепи методом контурных токов:

- желательно выбирать контурные токи так, чтобы через каждую индуктивно связанную катушку проходил только один контурный ток;
- при таком выборе контурных токов при составлении уравнений в общее сопротивление контура нужно добавить jX_M при согласном включении и $(-jX_M)$ при встречном.

Вид включения определяется по ориентации контурных токов относительно одноименных зажимов катушек.

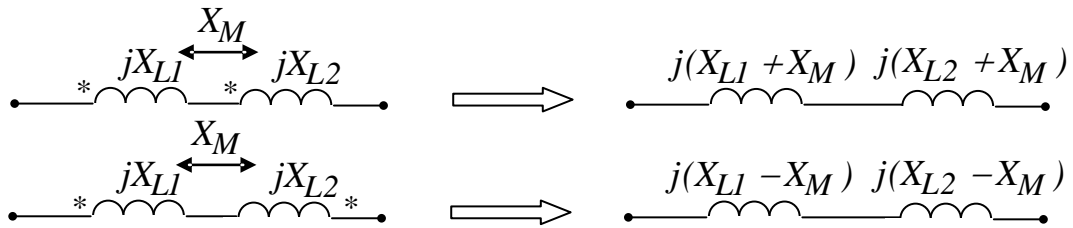
10. Потребляемая реактивная мощность с учетом индуктивной связи катушек определяется по формуле

$$Q_{\Pi} = \sum_i I_i^2 X_{Li} - \sum_k I_k^2 X_{Ck} \pm 2X_M I_d I_r \cos(\psi_d - \psi_r), \text{ где}$$

слагаемое $\pm 2X_M I_d I_r \cos(\psi_d - \psi_r)$ учитывает индуктивную связь; знак «+» ставится при согласном включении катушек и «-» при встречном; I_d, I_r – действующие значения токов индуктивно связанных катушек; ψ_d, ψ_r – их начальные фазы.

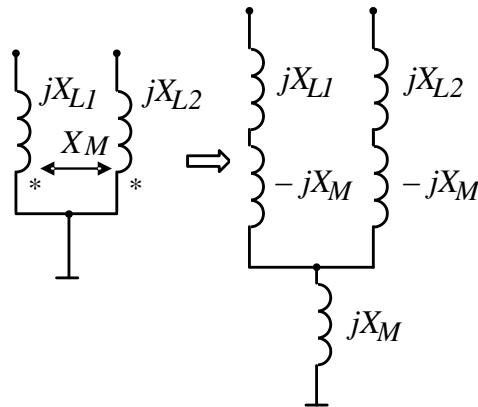
11. Развязка индуктивной связи используется с целью упрощения расчетов. После развязки схема может быть рассчитана любым методом.

12. Развязка последовательно соединенных катушек:

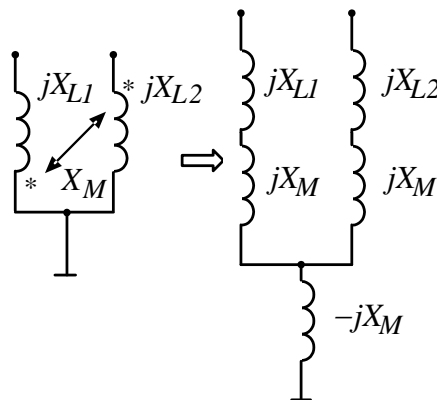


13. Развязка индуктивных связей катушек, имеющих общий узел:

- если катушки подключены к общему узлу одноименными зажимами, то в эквивалентной схеме без индуктивной связи последовательно к каждому из них подключается сопротивление $-jX_M$, а в общую ветвь сопротивление jX_M :



- если катушки подключены к общему узлу разноименными зажимами, то в эквивалентной схеме без индуктивной связи последовательно к каждому элементу подключается сопротивление jX_M , а в общую ветвь сопротивление $-jX_M$:



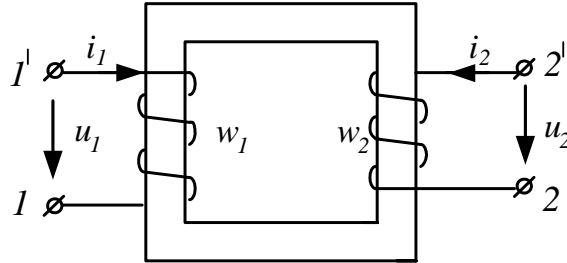
ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

ТЕРМИН	АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК	КИТАЙСКИЙ ЯЗЫК
взаимная индукция	mutual induction	相互(xiāng hù)感应(gǎn yìng)
взаимная индуктив- ность	mutual inductance	互感系数(hù gǎn xìshù)
встречное включение	counter connection	反(fǎn)接(jiē)
индуктивная связь	inductive coupling	电感(diàn gǎn)耦合(ǒu hé)
коэффициент связи	coupling coefficient mutual inductance	耦合系数(ǒu hé xìshù)
магнитный поток	magnetic flux	磁通量(cí tōng liàng)
одноимённые зажимы	terminals of the same name	同(tóng)向(xiàng)接线柱(jiē xiàn zhù)
параллельное соеди- нение катушек	parallel connection of coils	线圈(xiàn quān)并联(bìng lián)
последовательное со- единение катушек	series connection of coils	线圈(xiàn quān)串联(chuàn lián)
поток взаимной ин- дукции	the flow of mutual in- duction	互感(hù gǎn)磁通量(cí tōng liàng)
поток самоиндукции	flux of self inductance	自感(zì gǎn)磁通量(cí tōng liàng)
развязка индуктивной связи	decoupling	电感(diàn gǎn)耦合(ǒu hé)去(qù)耦(ǒu)
разноимённые зажимы	unlike terminals	异(yì)向(xiàng)接线柱(jiē xiàn zhù)
собственная индук- тивность	self inductance	自感(zì gǎn)
согласное включение	aiding connection	正(zhèng)接(jiē)

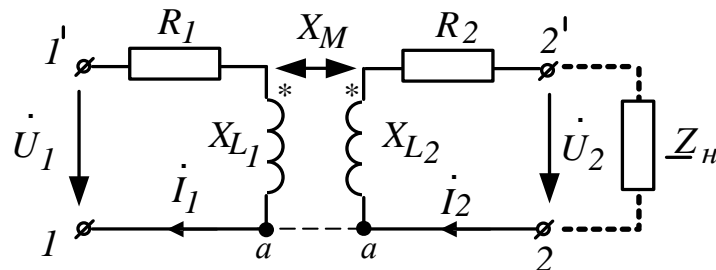
ТЕМА 5. ДВУХОБМОТОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР В ЛИНЕЙ- НОМ РЕЖИМЕ

1. Трансформатор предназначен для преобразования величин переменных токов и напряжений при неизменной частоте. В простейшем случае он представляет собой две обмотки на замкнутом сердечнике из ферромагнитного материала. Передача энергии из первичной во вторичную обмотку происходит благодаря явлению взаимной индукции. Обмотка 1-1¹ называется первич-

ной и подключается к источнику электроэнергии с напряжением u_1 , обмотка 2-2¹ называется вторичной и подключается к нагрузке с напряжением u_2 .



2. Схема замещения линейного трансформатора:



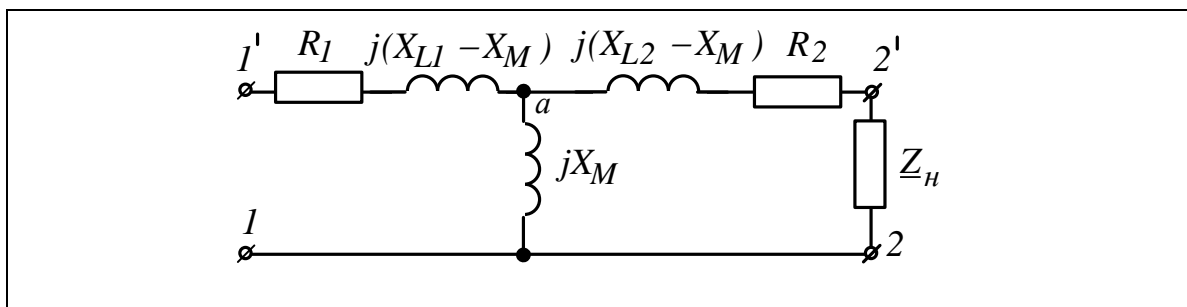
Уравнения трансформатора в линейном режиме:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 R_1 + jX_{L1} \dot{I}_1 - jX_M \dot{I}_2 &= \dot{U}_1; \\ \dot{I}_2 R_2 + jX_{L2} \dot{I}_2 + \dot{U}_2 - jX_M \dot{I}_1 &= 0, \\ \text{где } \dot{U}_2 &= \dot{I}_2 \underline{Z}_H = \dot{I}_2 (R_H + jX_H). \end{aligned}$$

3. Коэффициент трансформации – это отношение напряжения на зажимах обмотки высшего напряжения (вн) к напряжению на зажимах обмотки низшего напряжения (нн) в режиме холостого хода: $k_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{вн}}^x}{U_{\text{нн}}^x}$.

Если $U_1 > U_2$ и $R_1 \ll X_{L1}$, то $k_{\text{тр}} = \frac{w_1}{w_2}$, где w_1, w_2 – числа витков первичной и вторичной обмоток. Если в режиме холостого хода ($\underline{Z}_H = \infty, \underline{I}_2 = 0$) $U_1 > U_2$, $k_{\text{тр}} > 1$, то трансформатор называют понижающим, если $U_1 < U_2$, $k_{\text{тр}} < 1$ – повышающим.

4. Эквивалентная схема трансформатора без индуктивной связи (за общий узел принимается точка *a* в схеме замещения с индуктивной связью)

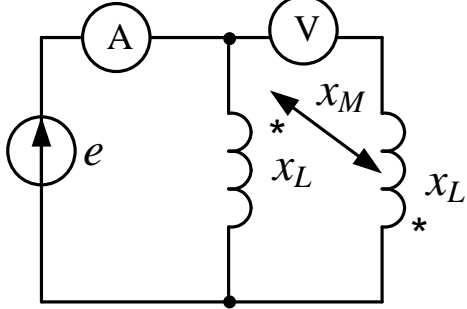
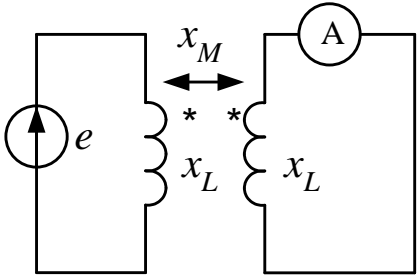
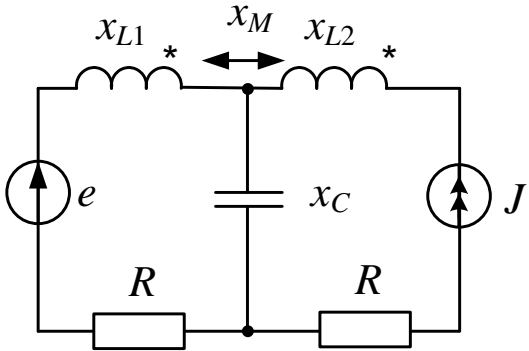


ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

ТЕРМИН	АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК	КИТАЙСКИЙ ЯЗЫК
вторичная обмотка	secondary winding	副线圈(fù xiàn quān)
двухобмоточный трансформатор	two-winding transformer	双绕组变压器(shuāng rǎo zǔ biàn yā qì)
коэффициент трансформации	transformation ratio	变压(biàn yā)系数(xìshù)
первичная обмотка	primary winding	主(zhǔ)线圈(xiàn quān)
повышающий трансформатор	step-up transformer	升压变压器(shēng yà biàn yā qì)
понижающий трансформатор	step-down transformer	降压变压器(jiàng yā biàn yā qì)
схема замещения линейного трансформатора	equivalent circuit of a linear transformer	线性(xiàn xìng)变压器(biàn yā qì)的(de)等效电路(děng xiào diàn lù)
трансформатор	transformer	变压器(biàn yā qì)
уравнения трансформатора	equations of the transformer	变压器(biàn yā qì)方程(fāng chéng)

Задачи к темам 4-5

1	<p>Определить входное сопротивление цепи, если $R = 10 \text{ Ом}$, $x_{L1} = 20 \text{ Ом}$, $x_{L2} = x_C = 10 \text{ Ом}$, $x_M = 5 \text{ Ом}$.</p>	
---	--	--

2	<p>Амперметр показывает 10 А, $x_L = 10 \text{ Ом}$, $x_M = 5 \text{ Ом}$. Определить показание вольтметра.</p>	
3	<p>Определить показание амперметра, если $e(t) = 30\sqrt{2} \sin(\omega t + 90^\circ) \text{ В}$, $x_L = 10 \text{ Ом}$, $x_M = 5 \text{ Ом}$.</p>	
4	<p>Определить вырабатываемую источником ЭДС мощность, если $e(t) = 100\sqrt{2} \sin(\omega t) \text{ В}$, $J(t) = 10\sqrt{2} \sin(\omega t + 90^\circ) \text{ А}$, $R = x_{L1} = x_{L2} = x_C = 20 \text{ Ом}$, $x_M = 10 \text{ Ом}$</p>	
<p>Ответы: 1) $12.5e^{j36.8^\circ} \text{ Ом}$; 2) 150 В; 3) 2 А; 4) -1000 ВА</p>		

ТЕМА 6. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

1. Переходным процессом называют процесс перехода от одного установившегося режима работы электрической цепи к другому.

Переходные процессы возникают при коммутации, т.е. включении или отключении элементов цепи, источников энергии, при коротких замыканиях, обрывах проводов, а также при импульсных воздействиях на цепь.

2. Коммутация – это процесс переключения цепи. Будем считать, что коммутация осуществляется мгновенно при помощи ключа в момент

времени $t = 0$ (рис.а – коммутация произойдет в момент замыкания ключа; рис.б – в момент размыкания).



Различают момент времени $t = 0_-$ (последний момент перед коммутацией) и $t = 0_+$ (первый момент после коммутации).

3. Причиной возникновения переходных процессов в цепях является наличие катушек индуктивности и конденсаторов, т.е. индуктивных и емкостных элементов в соответствующих схемах замещения. Объясняется это тем, что энергия магнитного поля $W_M = \frac{Li_L^2}{2}$, запасенная в катушке индуктивности, и электрического поля $W_{ЭЛ} = \frac{Cu_C^2}{2}$, запасенная в конденсаторе, не могут изменяться скачком при коммутации цепи.

4. Законы коммутации утверждают, что ток в индуктивном элементе и напряжение на емкостном элементе не могут изменяться скачком: $i_L(0_-) = i_L(0_+)$; $u_C(0_-) = u_C(0_+)$.

5. Классический метод расчета переходных процессов. Для схемы после коммутации составляется система уравнений по законам Кирхгофа, Ома, электромагнитной ($u_L = L \frac{di_L}{dt}$) и электростатической ($i_C = C \frac{du_C}{dt}$) индукции. Полученную систему сворачивают до одного дифференциального уравнения с одним неизвестным током или напряжением (допустим ток в одной из ветвей):

$$a_n \frac{d^n i(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} i(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{di(t)}{dt} + a_0 i(t) = f(t) \quad (1.1)$$

Уравнение (1.1) – линейное неоднородное дифференциальное уравнение n-го порядка, где a_n, a_{n-1}, \dots, a_0 – постоянные коэффициенты, определяемые параметрами цепи после коммутации; $f(t)$ – функциональная зависимость, определяемая источниками энергии после коммутации. Порядок этого уравнения не может превышать числа накопителей энергии (L и C) в схеме.

Полное решение, например, для тока $i(t)$ уравнения (1.1) можно представить в виде суммы частного решения неоднородного дифференциального уравнения (**принужденная составляющая**) и общего

решения однородного дифференциального уравнения (**свободная составляющая**):

$$i(t) = i_{\text{пр}}(t) + i_{\text{св}}(t).$$

6. Принужденная составляющая $i_{\text{пр}}(t)$ находится из расчета установившегося режима цепи после коммутации и повторяет закон изменения источника, действующего в цепи.

7. Свободная составляющая $i_{\text{св}}(t)$ определяется видом корней характеристического уравнения, которое составляется на основании дифференциального уравнения (1.1) путем замены $\frac{di^n(t)}{dt} \rightarrow p^n$ и приравнивания к нулю правой части. В результате получаем характеристическое уравнение

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0.$$

8. Корни характеристического уравнения могут быть:

а) вещественными, отрицательными и разные p_1, p_2, \dots, p_n , тогда свободная составляющая записывается в виде

$$i_{\text{св}}(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots + A_n e^{p_n t};$$

б) вещественными, отрицательными и одинаковыми

$$p_1 = p_2 = \dots = p_n = p$$

и свободная составляющая

$$i_{\text{св}}(t) = (A_1 + A_2 t + \dots + A_n t^{n-1}) e^{pt};$$

$\tau = \frac{1}{|p|}$ (с) - постоянная времени затухания экспоненты.

Длительность переходного процесса составляет $t_{\text{п}} = (4-5)\tau_{\text{max}}$

в) комплексными и попарно-сопряженными

$$p_{1,2} = -\delta_2 \pm j\omega_{\text{св}2}, p_{n-1,n} = -\delta_n \pm j\omega_{\text{св}n};$$

$$i_{\text{св}}(t) = A_2 e^{-\delta_2 t} \cos(\omega_{\text{св}2} t + \alpha_2) + \dots + A_n e^{-\delta_n t} \cos(\omega_{\text{св}n} t + \alpha_n),$$

где $A_1, A_2 \dots A_n; \alpha_1, \dots, \alpha_n$ - постоянные интегрирования, которые определяются из начальных условий в момент времени $t = 0_+$;

δ (1/с) - коэффициент затухания свободных колебаний;

$\tau = \frac{1}{\delta}$ (с) - постоянная времени затухания экспоненты;

$\omega_{\text{св}}$ (рад/с) - угловая частота свободных колебаний;

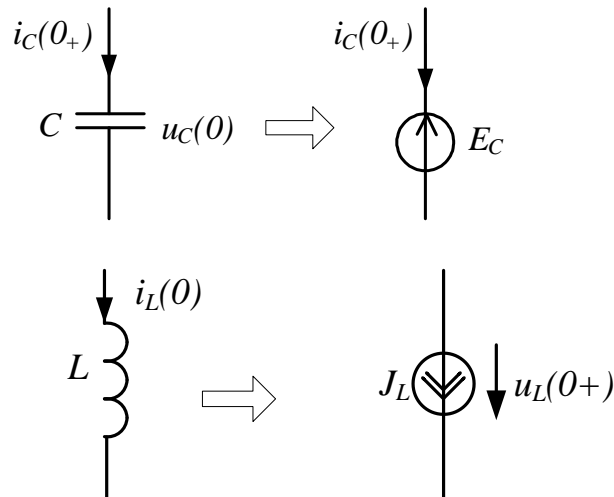
Длительность переходного процесса составляет $t_{\text{п}} = (4-5)\tau$

Различают независимые начальные условия (ННУ) и зависимые на-

чальные условия (ЗНУ).

9. Независимые начальные условия (ННУ) – это величины, которые подчиняются законам коммутации, т.е. ток в индуктивности и напряжение на емкости. Независимые начальные условия определяются из расчета установившегося режима цепи в схеме до коммутации (момент времени $t = 0_-$).

10. Зависимые начальные условия (ЗНУ) – это остальные токи и напряжения, определяемые в момент времени $t = 0_+$ с учетом того, что ток в индуктивности и напряжение на емкости в первый момент после коммутации сохраняют свои значения. В схеме после коммутации в момент времени $t = 0_+$ емкость и индуктивность заменяются источником ЭДС и источником тока:



Здесь: $J_L = i_L(0_-) = i_L(0_+) = i_L(0)$, $E_C = u_C(0_-) = u_C(0_+) = u_C(0)$

11. Алгоритм расчета переходного процесса классическим методом.

1. Искомую величину записываем в виде суммы принужденной и свободной составляющей.
2. Принужденную составляющую определяем из расчета установившегося режима после коммутационной цепи.
3. Составляем характеристическое уравнение и определяем его корни. Для составления характеристического уравнения источники ЭДС закорачиваем, ветви с источниками тока разрываем, L заменяем на pL , $C \rightarrow \frac{1}{pC}$, делаем разрыв в любом месте пассивной цепи и считаем общее сопротивление цепи относительно этого разрыва $Z(p)$. Из условия $Z(p) = 0$ находим корни характеристического уравнения.
4. В соответствии с видом корней записываем выражение для сво-

бодной составляющей в общем виде.

5. Входящие в это выражение постоянные интегрирования определяем из начальных условий.

12. Операторный метод расчета переходных процессов позволяет преобразовать дифференциальные уравнения переходного процесса в алгебраические при помощи прямого преобразования Лапласа. Функция действительной переменной времени t заменяется функцией комплексного переменного p , которая называется *оператором*.

Для прямого преобразования функций времени $f(t)$ применяется преобразование Лапласа:

$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt,$$

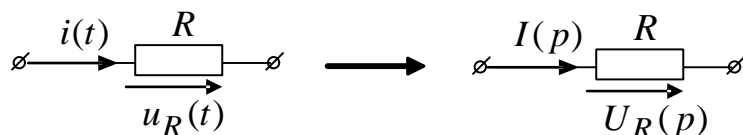
что сокращенно записывается так: $F(p) = L[f(t)]$,

где функция времени $f(t)$ называется *оригиналом*, определяется при $t > 0$, интегрируется в интервале времени $0 \div \infty$ и равняется нулю при $t < 0$; $F(p)$ – функция комплексного переменного $p = \sigma + j\omega$ при $\sigma > 0$, называется лапласовым *изображением*.

13. Изображение напряжения на резистивном элементе

$u_R(t) = Ri(t)$: $U_R(p) = R \int_0^{\infty} e^{-pt} i(t) dt = RI(p)$. Это выражение называется

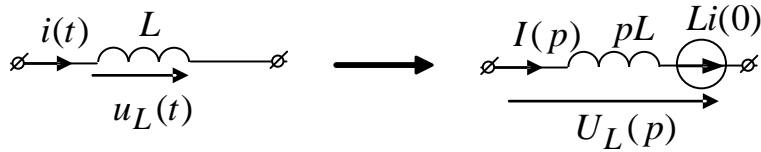
законом Ома в операторной форме для резистивного элемента.



Изображение напряжения $u_L = L \frac{di}{dt}$ на индуктивном элементе:

$$U_L(p) = -Li(0) + pLI(p),$$

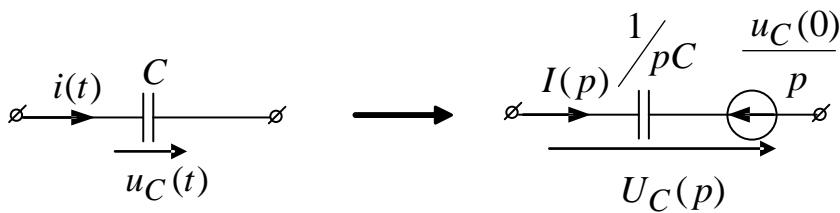
где $i(0) = i(0_-) = i(0_+)$ – ток в индуктивном элементе в момент коммутации, учитывающий начальные условия.



Изображение напряжения $u_C(t) = u_C(0) \cdot 1(t) + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt$ **на емко-**

стном элементе: $U_C(p) = \frac{u_C(0)}{p} + \frac{1}{pC} I(p)$, где

$u_C(0) = u_C(0_-) = u_C(0_+)$ – напряжение на емкостном элементе, соответствующее начальному условию.



14. Теорема разложения, полученная на основании обратного преобразования Лапласа, позволяет изображение, полученное в операторной форме, перевести в функцию времени t . Теорема разложения основана на обратном преобразовании Лапласа.

Если изображение имеет вид рациональной дроби

$$F(p) = \frac{A(p)}{B(p)} = \frac{a_0 + a_1 p + a_2 p^2 + \dots + a_m p^m}{b_0 + b_1 p + b_2 p^2 + \dots + b_n p^n},$$

причем $m < n$ и корни $A(p) = 0$ и $B(p) = 0$ различны, то на основании теоремы разложения функция времени запишется в виде

$$f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{A(p_k)}{B'(p_k)} e^{p_k t},$$

где p_k – корни знаменателя $B(p) = 0$; $B'(p_k) = \left. \frac{dB(p)}{dt} \right|_{p=p_k}$.

15. Порядок расчета переходных процессов операторным методом

1. Определяются независимые начальные условия $i_L(0_-) = i_L(0)$ и $u_C(0_-) = u_C(0)$.
2. Для схемы после коммутации составляется операторная схема за-

мещения, которая рассчитывается любым методом в операторной форме.

3. По теореме разложения определяются напряжения и токи в функции времени.

16. Интеграл Дюамеля применяют для расчёта тока или напряжения в ветвях схемы с нулевыми начальными условиями при действии единственного источника ЭДС или тока произвольной формы.

Наиболее распространённая форма записи:

$$f_p(t) = f(0)h(t) + \int_0^t f'(x)h(t-x)dx,$$

где $f_p(t)$ – искомая реакция цепи – ток или напряжение, $f(0)$ – начальное значение входного воздействия, $h(t)$ – переходная характеристика, $h(t-x)$ – переходная характеристика с учетом запаздывания, x – переменная интегрирования (время запаздывания), $f'(x)$ – производная от входного воздействия – ЭДС или тока источника.

17. Переходная характеристика $h(t)$ – это реакция линейной пассивной цепи в виде тока или напряжения переходного процесса на воздействие единичной функции, т. е. на подключение цепи к источнику постоянного напряжения или постоянного тока единичной величины $E(0)=1B$ или $J(0)=1A$ при нулевых начальных условиях $i_L(0)=0$, $u_C(0)=0$.

18. Порядок расчёта переходных процессов методом интеграла Дюамеля:

1. Классическим или операторным методом находят переходную характеристику $h(t)$.
2. Определяют запаздывающую переходную характеристику $h(t-x)$ путем замены t на $t-x$.
3. Вычисляют производную по времени x от входного воздействия – напряжения (тока) источника.
4. Записывают интеграл Дюамеля с момента времени $t=0$ до заданного t . При этом учитывают возможные скачки напряжения (тока) в начале и конце каждого интервала изменения входного сигнала.

ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

ТЕРМИН	АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК	КИТАЙСКИЙ ЯЗЫК
апериодический переходный процесс	aperiodic transient	非周期性(fēi zhōu qī xing)过渡(guò dù)状态(zhuàng tài)
декремент затухания	damping factor	递减(dì jiǎn)
длительность переходного процесса	time of transient	过渡(guò dù)状态(zhuàng tài)时间(shí jiān)
единичная функция	step function	恒等(héng děng)函数(hán shù)
зависимые начальные условия	dependent initial conditions	相关(xiāng guān)初始条件(chū shǐ tiáo jiàn)
законы коммутации	switching laws	转换(zhuǎn huàn)定律(dìng lǜ)
импульсная характеристика	impulse characteristic	脉冲(mài chōng)特性(tè xìng)
импульсное воздействие	impulse action	脉冲响应(mài chōng xiǎng yìng)
интеграл Дюамеля	Duhamel's integral	达(dá)梅(méi)尔(ěr)积分(jī fēn)
интервал времени	time interval	时间(shí jiān)区间(qū jiān)
классический метод расчета	classical method	经典(jīng diǎn)计算方法(jì suàn fāng fǎ)
ключ	switch	开关(kāi guān)
колебательный переходный процесс	oscillatory (periodic) transient, damping transient	振动(zhèn dòng)过渡(guò dù)状态(zhuàng tài)
коммутация	switching	转换(zhuǎn huàn)装置(zhuāng zhì), 整流(zhěng liú), 转换开关(zhuǎn huàn kāi guān), 多(duō)路(lù)传输(chuán shū)
корень характеристического уравнения	root of the characteristic equation	特征(tè zhēng)方程(fāng chéng)的(de)根(gēn)
коэффициент затухания свободных колебаний	damping coefficient	自由振荡(zì yóu zhèn dòng)的(de)衰减系数(shuāi jiǎn xì shù)
критический переходный процесс	critical transient	临界(lín jiè)过渡(guò dù)状态(zhuàng tài)
метод переменных со-	method of state variable	状态变量(zhuàng tài biàn liàng)法(fǎ)

СТОЯНИЯ		
независимые начальные условия	independent initial conditions	独立(dú lì)初始条件(chū shǐ tiáo jiàn)
обратное преобразование Лапласа	inverse Laplace transform	逆向(nì xiàng)拉普拉斯变换(lā pǔ lā sī biàn huàn)
оператор	operator	算符(suàn fú)
операторная схема замещения	operator equivalent circuit	算符(suàn fú)的(de)等价(děng jià)电路(diàn lù)
операторное изображение	Laplace transform	算符(suàn fú)成象(chéng xiàng)
операторный метод расчета	operational method	算符(suàn fú)计算方法(jì suàn fāng fǎ)
оригинал	inverse Laplace transform	原件(yuán jiàn)
переходный процесс	transient	过渡(guò dù)状态(zhuàng tài)
переходная характеристика	transient response	过渡(guò dù)特性(tè xìng)
постоянная времени	time constant	时间常数(shí jiān cháng shù)
постоянная интегрирования	constant of integration	积分常数(jī fēn cháng shù)
принужденная составляющая	steady state response or forced response	被迫(bèi pò)元件(yuán jiàn)
прямое преобразование Лапласа	direct Laplace transform	拉普拉斯(lā pǔ lā sī)直接(zhí jiē)变换(biàn huàn)
свободная составляющая	natural response (transient response)	自由(zì yóu)组件(zǔ jiàn)
скачок	jump	跳跃(tiào yuè)
теорема разложения	expansion theorem	分解(fēn jiě)定理(dìng lǐ)
угловая частота свободных колебаний	oscillation frequency	自由(zì yóu)震荡(zhèn dàng)角频率(jiǎo pín lǜ)
установившееся значение тока (напряжения)	steady value of current (voltage)	预置(yù zhì)电流(diàn liú)(电压(diàn yā))
характеристическое уравнение	characteristic equation	特征(tè zhēng)方程(fāng chéng)
цепь второго порядка	second-order circuit	二(èr)阶(jiē)电(diàn)路(lù)
цепь первого порядка	first-order circuit	一(yī)阶(jiē)电(diàn)路(lù)

Задачи к теме 6

<p>1</p>	<p>$E = 100\text{ В}; J = 1\text{ А};$ $R = 200\text{ Ом}.$ Определить: 1) $i_L(0_-), u_C(0_-);$ $u_L(0_+), i_C(0_+), u_J(0_+), i(0_+).$ 2) $i_{\text{пр}}, u_{J\text{пр}}.$</p>	
<p>2</p>	<p>$J = 2\text{ А}; R = 50\text{ Ом},$ $C = 50\text{ мкФ}.$ Определить $u_C(t)$ классическим и операторным методом.</p>	
<p>3</p>	<p>$L = 318.5\text{ мГн}, R = 100\text{ Ом},$ $e(t) = 200\sin(314t + 60^\circ)\text{ В}.$ Классическим методом определить ток $i(t).$</p>	
<p>4</p>	<p>$L = 100\text{ мГн}, R = 50\text{ Ом},$ $J(t) = 4e^{-1500t}\text{ А}.$ Определить ток $i_L(t)$ операторным методом и с помощью интеграла Дюамеля.</p>	
<p>5</p>	<p>$J = 6\text{ А}; R = 200\text{ Ом},$ $C = 100\text{ мкФ}, L = 300\text{ мГн}.$ Классическим методом определить $u_L(t).$</p>	

Ответы: 1) 0.25 A; 150 B; -50 B; 0 A, 100 B, 1.5 A, 1.5 A, 100 B;
 2) $u_C(t) = 100 - 50e^{-200t}$ B; 3) $i(t) = 1.26 \sin(314t + 42^\circ) + 0.21e^{-157t}$ A;
 4) $i_L(t) = 4e^{-1000t} - 4e^{-1500t}$ A; 5) $u_L(t) = -10.3e^{-34t} - 589.7e^{-991t}$ B.

Тема 7. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

1. **Трехфазная цепь** – это совокупность трех электрических цепей (фаз), в которых действуют одинаковые ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга на 120° :

$$e_A = E_m \sin \omega t; \quad e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \quad e_C = E_m \sin(\omega t + 120^\circ).$$

В комплексной форме: $\dot{E}_A = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = E_\phi$; $\dot{E}_B = E_\phi e^{-j120^\circ}$; $\dot{E}_C = E_\phi e^{j120^\circ}$.

Алгебраическая сумма симметричной трехфазной системы равна нулю:

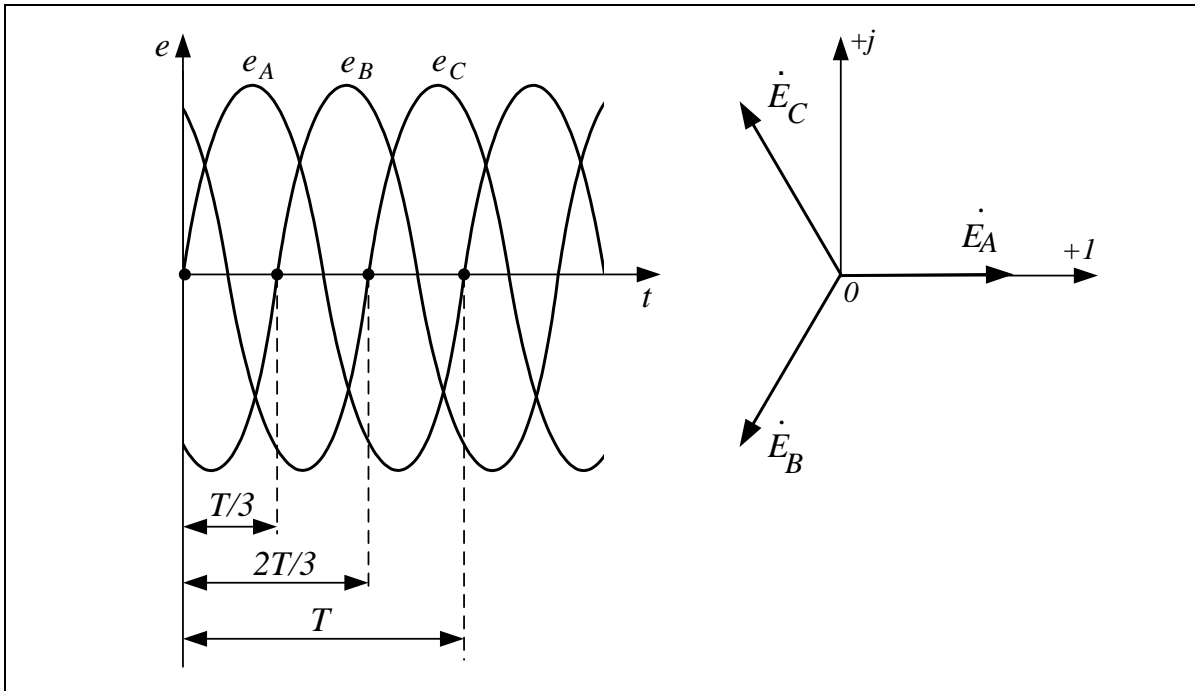
$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = E_\phi(1 + a^2 + a) = E_\phi(1 - 0.5 - 0.866j - 0.5 + 0.866j) = 0.$$

2. **Фазный множитель** a – это комплексная величина, которая применяется при расчете трехфазных цепей для упрощения записи:

$$a = e^{j120^\circ} = -0.5 + j0.866; \quad a^2 = e^{j240^\circ} = -0.5 - j0.866; \quad a^3 = e^{j360^\circ} = 1$$

$$\dot{E}_A = E_\phi; \quad \dot{E}_B = E_\phi a^2; \quad \dot{E}_C = E_\phi a$$

3. Система ЭДС (напряжений, токов) называется **симметричной**, если она состоит из одинаковых по модулю ЭДС (напряжений, токов) одной и той же частоты, но сдвинутых относительно друг друга на 120° .



4. Соединение « звезда – звезда » с нулевым проводом (Y/Y)

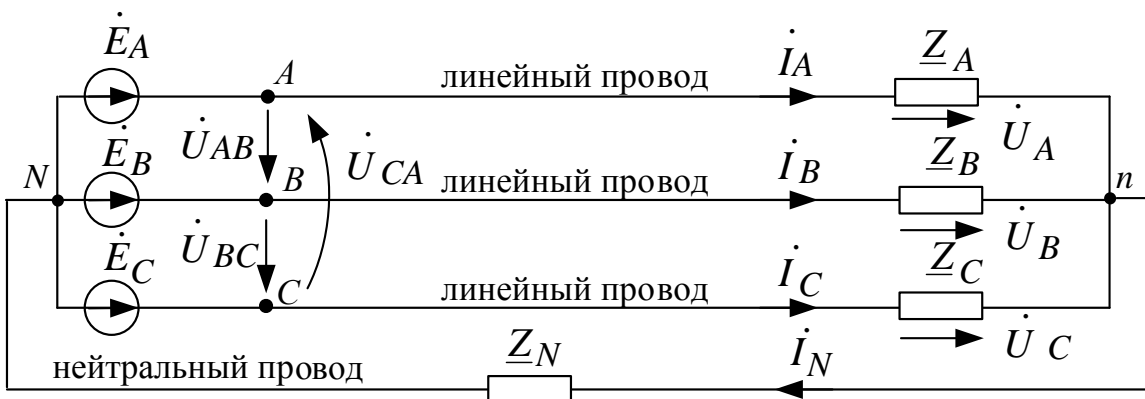
Линейные провода – это провода соединяющие источники с приемниками.

Линейные напряжения – это напряжения между линейными проводами ($\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$).

Линейные токи ($\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$) текут от источника к приемнику. **Нейтральный провод** – это провод, соединяющий нейтральную точку источников N и нейтральную точку приемников n .

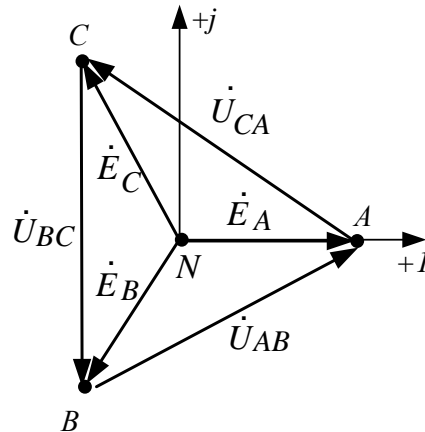
Фазные напряжения приемника – это напряжения между линией и точкой n ($\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$).

$\dot{U}_N = \dot{I}_N Z_N$ – напряжение смещения нейтрали, показывает смещение точки n по отношению к точке N .



Векторная диаграмма ЭДС и линейных напряжений при соедине-

нии фаз генератора звездой:



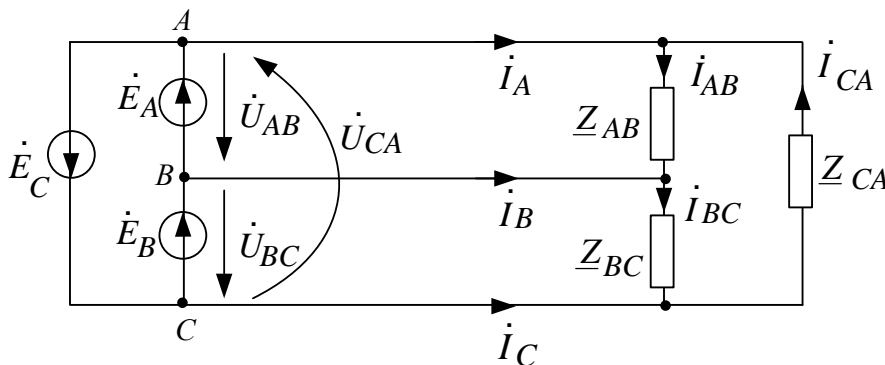
Линейные напряжения больше фазных ЭДС в $\sqrt{3}$ раз: $\dot{U}_л = \sqrt{3}\dot{E}_\phi e^{j30^\circ}$.

5. Соединение «треугольник-треугольник» (Δ/Δ)

$$\dot{U}_{AB} = \dot{E}_A; \dot{U}_{BC} = \dot{E}_B; \dot{U}_{CA} = \dot{E}_C.$$

Фазные токи – это токи, текущие в нагрузке ($\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$).

При соединении нагрузки звездой фазные токи равны линейным.



6. Расчет симметричных цепей

Трехфазная цепь называется симметричной, если комплексные сопротивления фаз одинаковы. В этом режиме системы токов и напряжений будут также симметричны, поэтому расчет ведется для одной фазы, а токи и напряжения остальных фаз находятся поворотом найденных векторов на угол 120° или -120° .

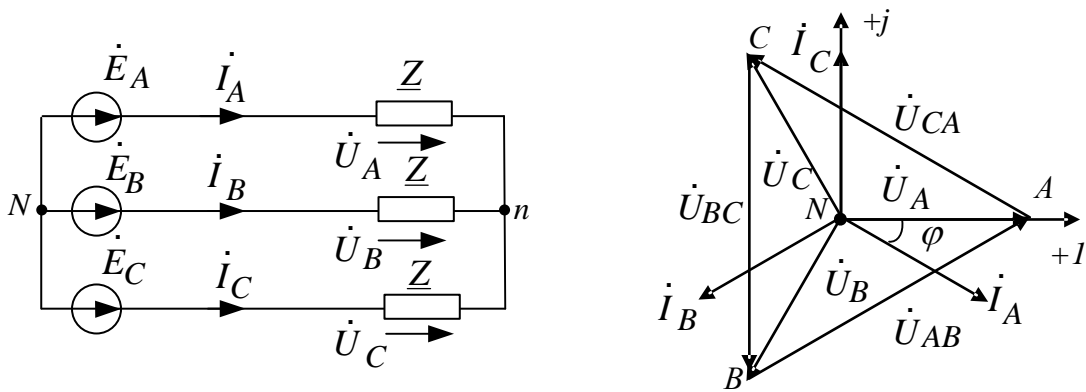
Соединение «звезда – звезда»

Известны $\dot{E}_A, \dot{E}_B = a^2 \dot{E}_A; \dot{E}_C = a \dot{E}_A$ и $Z_A = Z_B = Z_C = Z = Ze^{j\varphi}$.

Найти все линейные токи: $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$

Нейтральные точки источника и нагрузки в симметричном режиме мо-

гут быть соединены, так как они имеют одинаковые потенциалы.



Тогда $i_A = \dot{E}_A / \underline{Z}$; $i_B = a^2 i_A$; $i_C = a i_A$.

Нейтральный провод не нужен, так как

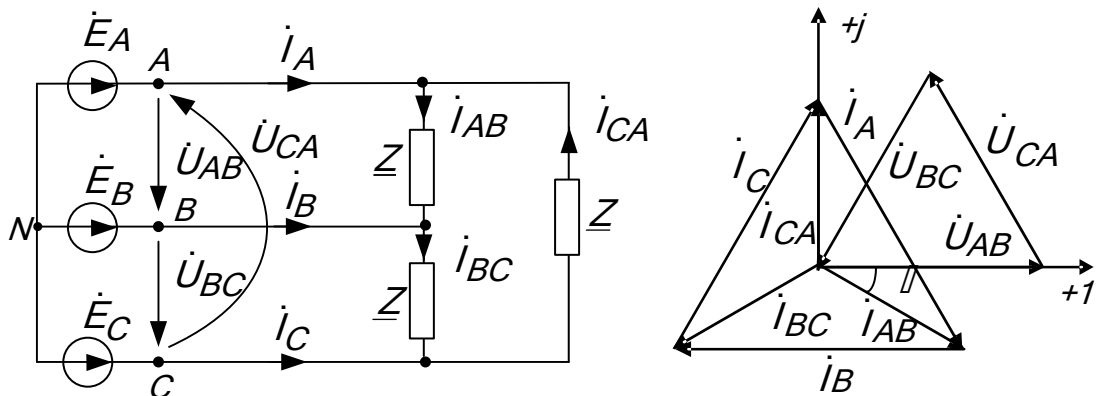
$$i_N = i_A + i_B + i_C = (1 + a^2 + a)i_A = 0; \dot{U}_N = i_N \underline{Z}_N = 0.$$

Фазные напряжения $\dot{U}_A = i_A \underline{Z}$; $\dot{U}_B = a^2 \dot{U}_A$; $\dot{U}_C = a \dot{U}_A$.

Линейные напряжения определяются как разности соответствующих фазных напряжений, например: $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$. Также можно рассчиты-

тать как $\dot{U}_{AB} = \sqrt{3} \dot{U}_A e^{j30^\circ}$, тогда $\dot{U}_{BC} = a^2 \dot{U}_{AB}$; $\dot{U}_{CA} = a \dot{U}_{AB}$.

Соединение «звезда – треугольник»



Известны \dot{E}_A , $\dot{E}_B = a^2 \dot{E}_A$; $\dot{E}_C = a \dot{E}_A$ и $\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA} = \underline{Z} = Z e^{j\varphi}$.

Найти линейные и фазные токи.

Определим линейное напряжение $\dot{U}_{AB} = \dot{E}_A - \dot{E}_B$, тогда по закону Ома

$$i_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}} \text{ и } i_{BC} = a^2 i_{AB}; i_{CA} = a i_{AB}.$$

При симметричной нагрузке $i_{\text{л}} = \sqrt{3} i_{\text{ф}} e^{-j30^\circ}$ (см. векторную диаграм-

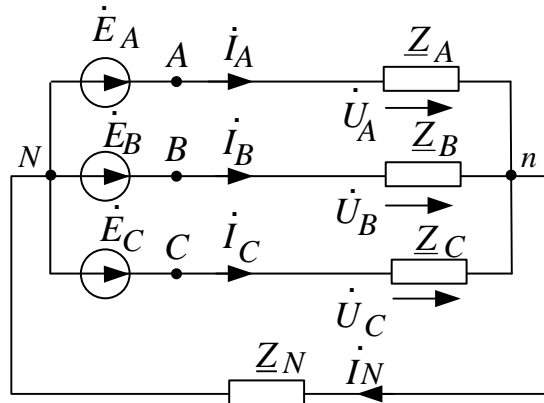
му), следовательно, $\dot{I}_A = \sqrt{3}\dot{I}_{AB}e^{-j30^\circ}$; $\dot{I}_B = a^2\dot{I}_A$; $\dot{I}_C = a\dot{I}_A$.

7. Расчет несимметричных цепей

Соединение «звезда – звезда»

Известны \dot{E}_A , $\dot{E}_B = a^2\dot{E}_A$; $\dot{E}_C = a\dot{E}_A$ и $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$.

Найти все линейные токи: $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ и ток в нейтральном проводе.



1. $\underline{Z}_N = 0$, следовательно $\dot{U}_N = \dot{I}_N \underline{Z}_N = 0$, $\dot{\phi}_N = \dot{\phi}_n$, поэтому $\dot{U}_A = \dot{E}_A$; $\dot{U}_B = \dot{E}_B$; $\dot{U}_C = \dot{E}_C$.

Тогда $\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{\underline{Z}_A}$; $\dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B}{\underline{Z}_B}$; $\dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C}{\underline{Z}_C}$; $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

2. $\underline{Z}_N = \infty$, следовательно $\dot{U}_N \neq 0$.

Так как в схеме имеются только два узла, проведем расчет методом узловых потенциалов. Пусть $\phi_N = 0$, тогда напряжение смещения нейтралей равно:

$$\dot{U}_N = \dot{\phi}_n = \frac{\underline{Y}_A \cdot \dot{E}_A + \underline{Y}_B \cdot \dot{E}_B + \underline{Y}_C \cdot \dot{E}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N},$$

где $\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}$; $\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}$; $\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}$; $\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}$ – проводимости соответствующих ветвей. По второму закону Кирхгофа находим линейные токи:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A - \dot{U}_N}{\underline{Z}_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B - \dot{U}_N}{\underline{Z}_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C - \dot{U}_N}{\underline{Z}_C}.$$

Ток нейтрального провода $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_N}{\underline{Z}_N}$.

8. Вывод:

При различных сопротивлениях фаз и наличии сопротивления в нулевом проводе $\underline{Z}_N \neq 0$ фазные напряжения различны. Если нулевой про-

вод отсутствует ($\underline{Z}_N = \infty$ и $\underline{Y}_N = 0$), то все вышеприведенные формулы справедливы, причем $\dot{I}_N = 0$ и фазные напряжения также будут различными. Если $\underline{Z}_N = 0$, то $\dot{U}_N = 0$ и фазные напряжения образуют симметричную систему: $\dot{U}_A = \dot{E}_A$; $\dot{U}_B = \dot{E}_B$; $\dot{U}_C = \dot{E}_C$.

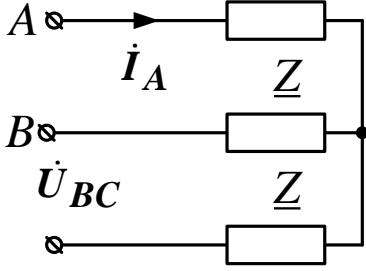
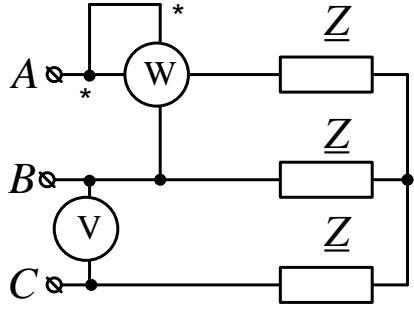
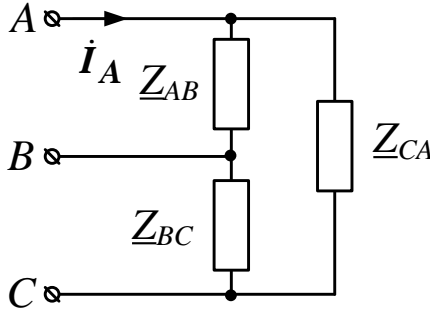
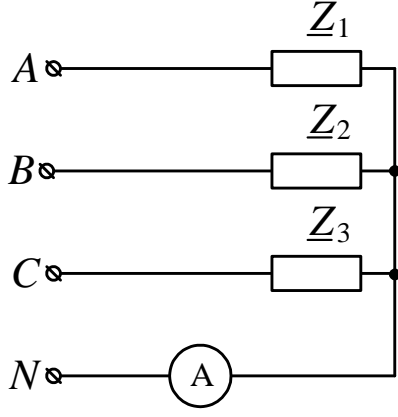
ТЕРМИНОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ

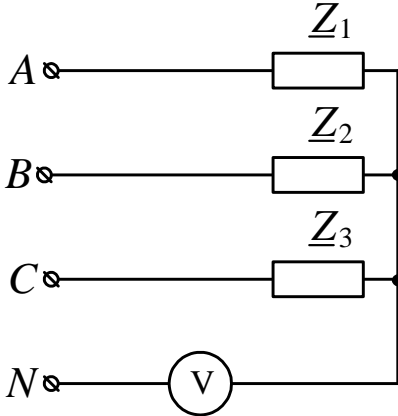
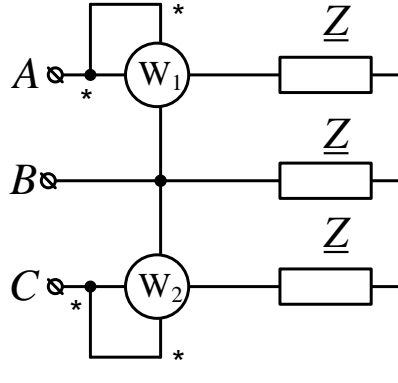
ТЕРМИН	АНГЛИЙСКИЙ ЯЗЫК	КИТАЙСКИЙ ЯЗЫК
асинхронный двигатель	induction motor	异步电动机(yì bù diàn dòng jī)
ваттметр	wattmeter	瓦特计(wǎ tè jì)
векторная диаграмма ЭДС	vector diagram of the e.m.f.	电势(diàn shì)向量(xiàng liàng)图(tú)
круговое вращающееся магнитное поле	rotating field	圆形(yuán xíng)旋转磁场(xuán zhuǎn cí chǎng)
линейные напряжения	line voltages	线电压(xiàn yǎn)电压(diàn yā)
линейные провода	linear wire	线导线(xiàn dòng xiǎo)传导(chuán dǎo)
линейные токи	line currents	线电流(xiàn diàn liú)电流(diàn liú)
метод симметричных составляющих	method of symmetrical components	对称(duì chèn)分量(fèn liàng)法(fǎ)
напряжение смещения нейтралей	bias voltage	中性点(zhōng xìng diǎn)偏移(piān yí)电压(diàn yā)
нулевой (нейтральный) провод	neutral wire	零线(líng xiàn), 中性线(zhōng xìng xiàn)
ротор	rotor	转子(zhuǎn zǐ)
симметричная система ЭДС	balanced three-phase source	电势(diàn dòng shì)对称系统(duì chèn xì tǒng)
синхронный генератор	synchronous generator	同步发电机(tóng bù fā diàn jī)
синхронный двигатель	synchronous motor	同步电机(tóng bù diàn jī)

соединение «звезда - треугольник»	Wye-Delta connection	点(diǎn)- 三(sān)角(jiǎo)式(shì)连接(lián jiē)
соединение «звезда-звезда»	Wye-Wye connection	点(diǎn)- 点(diǎn)式(shì)连接(lián jiē)
соединение «треугольник-треугольник»	Delta-Delta connection	三(sān)角(jiǎo)- 三(sān)角(jiǎo)式(shì)连接(lián jiē)
составляющие нулевой последовательности	zero sequence components	零序分量(líng xù fèn liàng)
составляющие обратной последовательности	negative sequence components	反(fǎn)序(xù)分量(fèn liàng)
составляющие прямой последовательности	positive sequence components	直(zhí)序(xù)分量(fèn liàng)
статор	stator	定子(dìng zǐ)
ток нулевого провода	neutral current	零线(líng xiàn)电流(diàn liú)
трехфазная цепь	three-phase circuit	三相(sān xiàng)电路(diàn lù)
фазные напряжения	phase voltages	三相(sān xiàng)电压(diàn yā)
фазные токи	phase currents	三相(sān xiàng)电流(diàn liú)
фазный множитель	phase factor	相位因子(xiàng wèi yīn zǐ)

Задачи к теме 7

1	<p>Определить ток \dot{I}_C, если $\underline{Z} = j400 \text{ Ом}$ и напряжение симметричного трехфазного источника $\dot{U}_{AB} = 380e^{-j30^\circ} \text{ В}$.</p>	
---	---	--

2	<p>Определить напряжение \dot{U}_{BC} симметричного трехфазного источника, если $\underline{Z} = j200 \text{ Ом}$ и ток $\dot{I}_A = 0.636e^{-j30^\circ} \text{ А}$.</p>	
3	<p>Трехфазный источник симметричен. Определить показание ваттметра, если показание вольтметра $U = 380 \text{ В}$ и $\underline{Z} = j100 \text{ Ом}$.</p>	
4	<p>Определить ток \dot{I}_A, если $\underline{Z}_{AB} = -j20 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{BC} = -j20 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{CA} = -j10 \text{ Ом}$ и линейное напряжение симметричного трехфазного источника, если $\dot{U}_{AB} = 220 \text{ В}$.</p>	
5	<p>Трехфазный источник с фазной ЭДС $E_\phi = 200 \text{ В}$ симметричен. Определить показание амперметра, если $\underline{Z}_1 = 100 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_2 = -j100 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_3 = j100 \text{ Ом}$.</p>	

6	Трехфазный источник с фазной ЭДС $E_{\phi} = 100\text{ В}$ симметричен. Определить показание вольтметра, если $\underline{Z}_1 = j50\text{ Ом}$, $\underline{Z}_2 = j200\text{ Ом}$ и $\underline{Z}_3 = -j200\text{ Ом}$.	
7	В цепь трехфазного источника с $U_{\text{л}} = 200\text{ В}$ включены два ваттметра, показания которых $P_{W1} = 0$, $P_{W2} = 1.73\text{ кВт}$. Определить модули линейных токов.	
<p>Ответы: 1) $1.64e^{-j30^0}\text{ А}$; 2) $220e^{-j30^0}\text{ В}$; 3) -418 Вт; 4) $29e^{j50^0}\text{ А}$; 5) 5.46 А; 6) 109 В; 7) 10 А.</p>		

1. Общие методические указания к выполнению расчетно-графических работ.

Темы расчетно-графических работ, рекомендуемые к выполнению учебной программы по общей электротехнике:

РГР №1 «Расчет линейной цепи постоянного тока».

РГР №2 «Расчет линейной цепи синусоидального тока».

РГР №3 «Переходные процессы в линейных электрических цепях».

К представленным на рецензию индивидуальным домашним заданиям предъявляются следующие требования:

1. Задания должны быть выполнены на чистых листах бумаги формата А4, обязательно сшитых.
2. Основные действия при выполнении задания должны сопровождаться достаточно подробными пояснениями.

3. Рисунки, графики, схемы, в том числе и заданные условием задачи, должны быть выполнены на отдельном листе бумаги (странице) аккуратно и в удобном для чтения масштабе.
4. Вычисления должны быть выполнены с точностью до третьей значащей цифры.
5. Задание должно быть подписано студентом и указана дата.

2. Расчетно-графическая работа №1.

Расчет линейной цепи постоянного тока.

На рис.1 представлен граф электрической цепи. Граф содержит 4 узла – a, b, c, d , между которыми включены 6 ветвей – ab, ac, bc, bd, da, dc . Ветви содержат активные и пассивные элементы электрической цепи и обозначены номерами 1...6 (рис.2). В таблице №1 заданы параметры источников электрической цепи E_1, E_2, J , в таблице №2 заданы параметры пассивных элементов – R, L, C , в таблице №3 заданы варианты компоновки электрической цепи.

Номер варианта каждого студента содержит 4 цифры – первая цифра номера соответствует данным из табл.№1, вторая цифра номера – данным из табл.№2, третья и четвертая цифра номера соответствуют варианту схемы из табл.№3.

1. Полагая, что в цепи с постоянными токами и напряжениями индуктивность имеет нулевое сопротивление, а емкость – нулевую проводимость, изобразить схему, достаточную для расчета параметров режима цепи при постоянных во времени источниках энергии: $e_1(t)=E_1, e_2(t)=E_2, J(t)=J$.
2. Преобразовать схему до трех контуров, заменив ветви с параллельным и последовательным соединениями резисторов на эквивалентные.
3. Выбрать направления токов в ветвях схемы (в ветвях с источниками ЭДС токи задать по направлению ЭДС).
4. Составить полную систему уравнений состояния цепи по законам Кирхгофа, рассчитать токи всех ветвей и напряжение на источнике тока.
5. Методом контурных токов рассчитать токи всех ветвей и (по второму закону Кирхгофа) напряжение на источнике тока.
6. Методом узловых потенциалов (напряжений) рассчитать токи всех ветвей и (по второму закону Кирхгофа) напряжение на источнике тока.
7. Определить показание вольтметра включенного параллельно ветви №6.

8. Составить баланс мощностей, вычислив суммарную мощность источников энергии, и суммарную мощность, потребляемую резисторами. Небаланс не должен превышать 3 %.
9. Представить схему относительно ветви №4 с сопротивлением $2R$ эквивалентным генератором и определить его параметры ($E_{г}$, $R_{г}$, $I_{кз}$). Графически и аналитически определить ток в сопротивлении $2R$.
10. Построить потенциальную диаграмму для любого замкнутого контура, не содержащего источника тока.
11. Результаты расчета токов по трем методам свести в таблицу и сравнить между собой.

3. Расчетно-графическая работа №2.

Расчет линейной цепи синусоидального тока.

Для электрической цепи, схема и параметры которой соответствуют номеру варианта, при заданных параметрах источников, $e_1(t) = E_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + 90^\circ) B$, $e_2(t) = E_2 \sqrt{2} \sin(\omega t - 45^\circ) B$, $J(t) = J \sqrt{2} \sin(\omega t + 30^\circ) A$, $f = 50 Гц$ выполнить следующее:

1. Изобразить схему цепи и обозначить индуктивную связь между катушками, полагая взаимную индуктивность равной $M = 0.5L$.
2. Преобразовать схему, заменив ветви с параллельным и последовательным соединениями резисторов на эквивалентные и в общем (буквенном) виде составить полную систему уравнений состояния цепи по законам Кирхгофа в дифференциальной форме.
3. Представить сопротивления ветвей и действующие значения ЭДС и тока источников в комплексной форме и изобразить комплексную схему замещения цепи.
4. В полученной схеме методом уравнений Кирхгофа рассчитать комплексы действующих значений токов ветвей и напряжения на источнике тока.
5. Составить баланс активных и реактивных мощностей источников и потребителей электрической энергии. Небаланс как по активной, так и по реактивной мощностям не должен превышать 3 %.
6. Сделать развязку индуктивной связи, представить схему относительно ветви №4 с сопротивлением $2R$ эквивалентным генератором и определить его параметры ($E_{г}$, $Z_{г}$), Рассчитать ток в сопротивлении $2R$.
7. Определить показание вольтметра включенного параллельно ветви №6.

8. Построить топографическую векторную диаграмму напряжений, совмещенную с лучевой векторной диаграммой токов для контура с индуктивной связью.

Таблица №1

№ вар	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$E_1, В$	20	30	40	50	60	70	80	90	100	120
$E_2, В$	100	120	150	180	200	220	250	50	60	80
$J, А$	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

Таблица №2

№ вар	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R, Ом$	10	20	30	40	50	60	80	100	120	140
$L, мГн$	31,84	63,7	95,54	127,3	159,2	191	254,7	318,4	382,1	445,8
$C, мкФ$	318,4	159,23	106,1	79,62	63,7	53,08	39,8	31,847	26,54	22,74

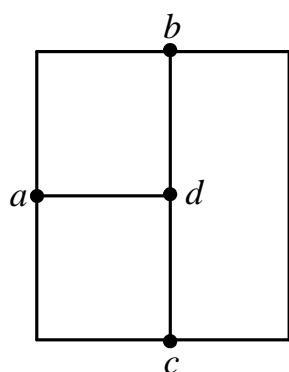


Рис.1. Граф электрической цепи

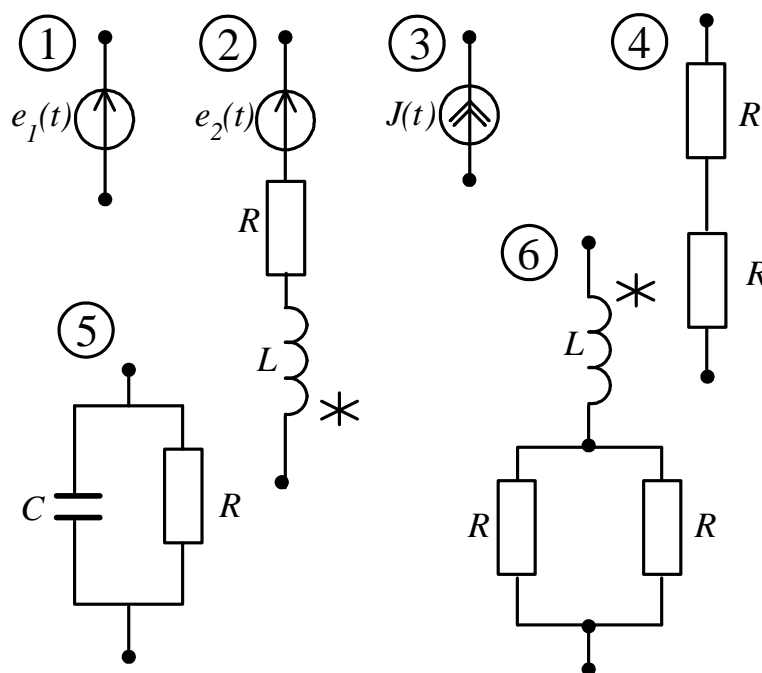


Рис.2. Элементы электрической цепи

Таблица №3

Ветви	<i>ab</i>	<i>ac</i>	<i>bc</i>	<i>bd</i>	<i>da</i>	<i>dc</i>
№ вар.						
01	3	1	6	2	5	4
02	3	1	5	4	6	2
03	2	6	1	5	3	4
04	1	5	2	6	3	4
05	1	5	3	4	2	6
06	6	2	1	5	3	4
07	1	5	6	2	3	4
08	1	5	3	4	6	2
09	2	6	1	3	4	5
10	1	3	2	6	4	5
11	1	3	4	5	2	6
12	6	2	1	3	4	5
13	1	3	6	2	4	5
14	1	3	4	5	6	2
15	2	6	4	1	3	5
16	4	1	2	6	3	5
17	4	1	3	5	2	6
18	6	2	4	1	3	5
19	4	1	6	2	3	5
20	4	1	3	5	6	2
21	2	6	1	3	5	4
22	1	3	2	6	5	4
23	1	3	5	4	2	6
24	6	2	1	3	5	4
25	1	3	6	2	5	4
26	1	3	5	4	6	2
27	2	6	3	1	5	4
28	3	1	2	6	5	4
29	3	1	5	4	2	6
30	6	2	3	1	5	4

4. Расчетно-графическая работа №3.

Переходные процессы в линейных электрических цепях

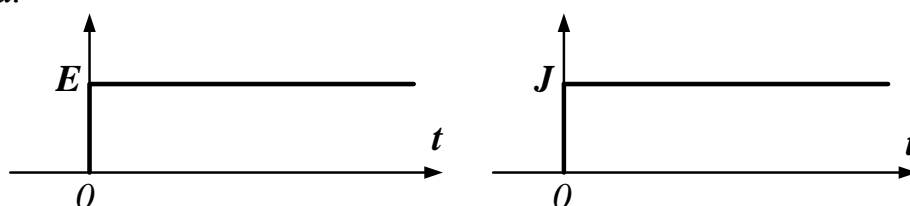
На рис.3 представлены схемы электрических цепей, на вход которых воздействуют сигналы различной формы, на рис.4 изображен сиг-

нал непериодической формы, в таблице 4 заданы параметры электрических цепей.

Номер варианта каждого студента содержит 4 цифры – первая цифра соответствует номеру схемы (рис.3), вторая цифра соответствует сигналу непериодической формы, одинаковому для всех вариантов (рис.4), третья и четвертая цифры соответствуют данным из табл.4.

Для схемы, изображенной на рис.3, рассчитать ток или напряжение переходного процесса:

- а) **классическим и операторным методами** при включении в момент времени $t = 0_+$ постоянного источника ЭДС или источника тока:



Построить график напряжения $u(t)$ или тока $i(t)$ на интервале $0 \leq t \leq 4\tau$, где τ - постоянная времени переходного процесса.

- б) **методом интеграла Дюамеля** при воздействии сигнала непериодической формы, изображенного на рис.4 а,б (форма сигнала выбирается по согласованию с преподавателем).

Примечание: $A = E$ (для цепей с источником ЭДС)

$A = J$ (для цепей с источником тока)

$t_1 = 3\tau$ (τ - постоянная времени переходного процесса)

Построить график напряжения $u(t)$ или тока $i(t)$ на интервалах $0 \leq t \leq t_1, t \geq t_1$.

- в) **классическим методом** при гармоническом источнике:

$e(t) = E \sin(\omega t + \alpha)$, $J(t) = J \sin(\omega t + \alpha)$, на интервале времени $0 \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega}$

Частота ω определяется из условия $R = X_L = \omega L$ или $R = X_C = \frac{1}{\omega C}$.

Построить график выходного напряжения $u(t)$ или тока $i(t)$.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

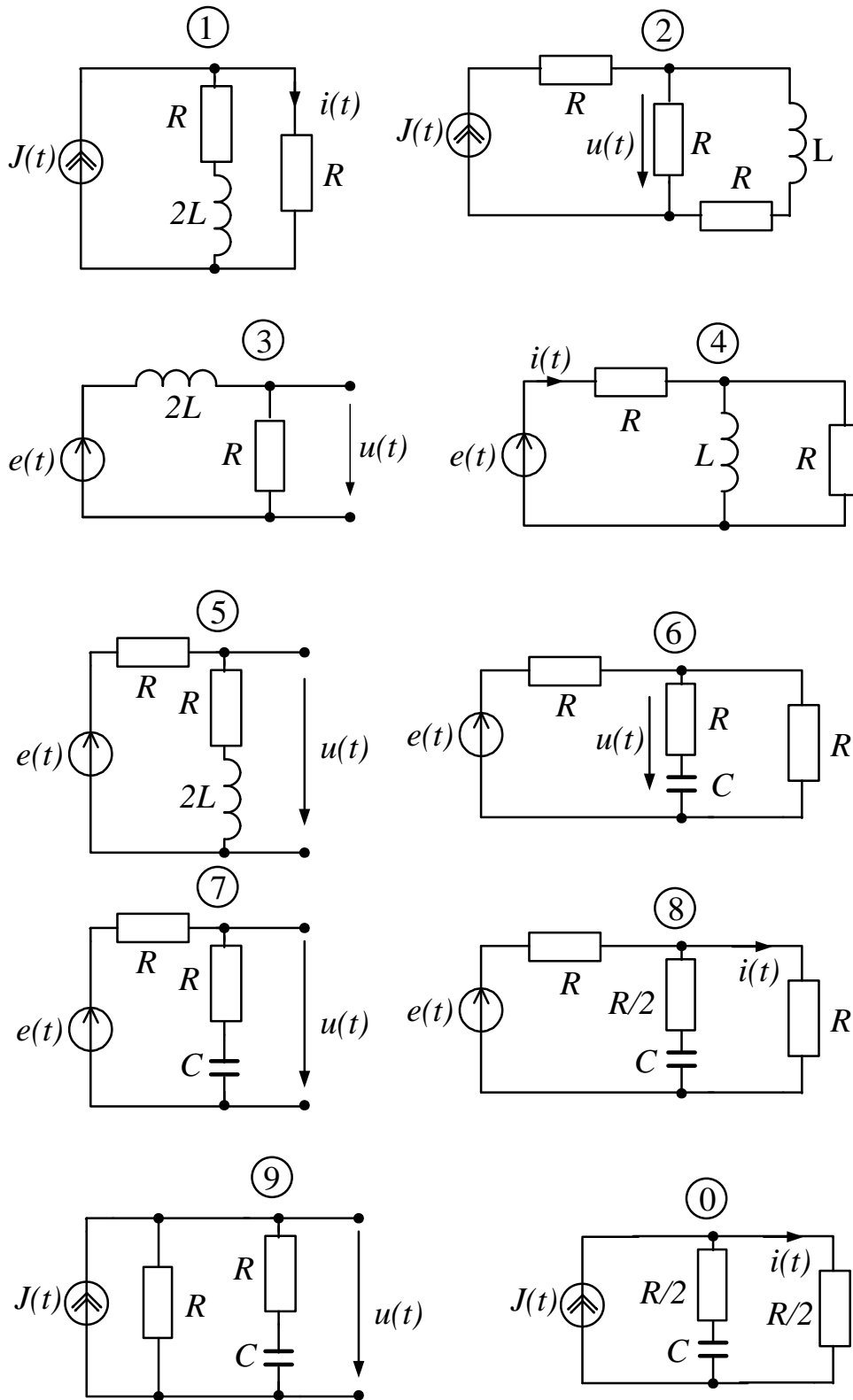


Рис.3

СИГНАЛ НЕПЕРИОДИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

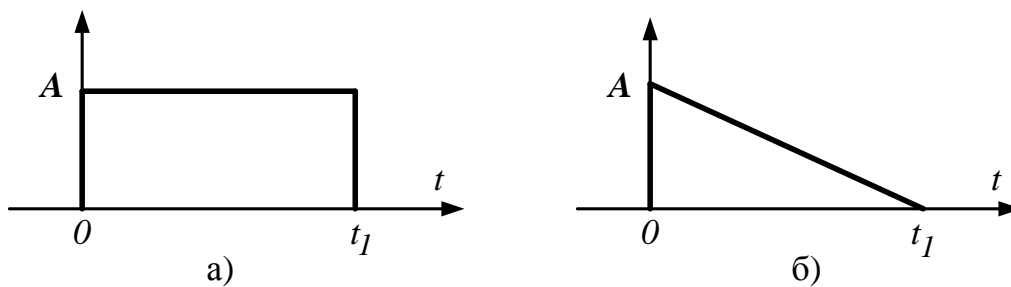


Рис. 4

Таблица №4

№ Вар	<i>E</i>	<i>J</i>	<i>R</i>	<i>L</i>	<i>C</i>	α
	В	А	Ом	Гн	мкФ	град
01	10	1	20	0.2	500	30
02	20	2	30	0.3	333.33	60
03	30	3	40	0.4	250	90
04	40	4	50	0.5	200	-30
05	50	5	60	0.6	166.6	-60
06	60	6	70	0.7	142.85	-90
07	70	7	80	0.8	125	45
08	80	8	90	0.9	111.11	-45
09	90	9	100	1	100	120
10	100	10	120	1.2	83.33	150
11	15	1.5	12	0.24	1666.66	30
12	25	2.5	22	0.44	909.1	-120
13	35	3.5	32	0.64	625	-150
14	45	4.5	42	0.84	476.2	30
15	55	5.5	52	1.04	384.61	60
16	65	6.5	62	1.24	322.58	90
17	75	7.5	72	1.44	277.77	45
18	85	8.5	82	1.64	243.9	120
19	95	9.5	92	1.84	217.39	150
20	105	10.5	110	2.2	181.82	-30
21	12	1.2	16	0.48	1875	-60
22	22	2.2	26	0.78	1153.84	-90
23	32	3.4	36	1.08	833.33	-120
24	42	4.2	46	1.38	652.17	-150

25	52	5.2	56	1.68	535.71	-45
26	62	6.2	66	1.98	454.54	30
27	72	7.2	76	2.28	394.73	60
28	82	8.9	86	2.58	348.83	90
29	92	9.2	96	2.88	312.5	120
30	110	10.2	106	3.18	283.02	150

6. Методические указания к выполнению расчетно-графической работы №1.

Свойства линейных электрических цепей и методы их расчета подробно изложены в [1 - 4].

Порядок решения РГР №1 следующий.

1. Используя таблицу 1, определяем структуру схемы (номер условный, в таблице такого номера нет):

Ветви	<i>ab</i>	<i>ac</i>	<i>bc</i>	<i>bd</i>	<i>da</i>	<i>dc</i>
№ вар.						
	1	6	5	3	4	2

Из табл.2 находим параметры элементов цепи (параметры также условные):

№ вар.	E_1	E_2	J	R	L	C
	В	В	А	Ом	мГн	мкФ
	100	50	2	110	350	28.95

По заданному графу построим схему электрической цепи (рис.5).

Примечание: в цепи постоянного тока индуктивность имеет нулевое сопротивление и заменяется «закороткой», а ёмкость – нулевую проводимость и заменяется «разрывом цепи».

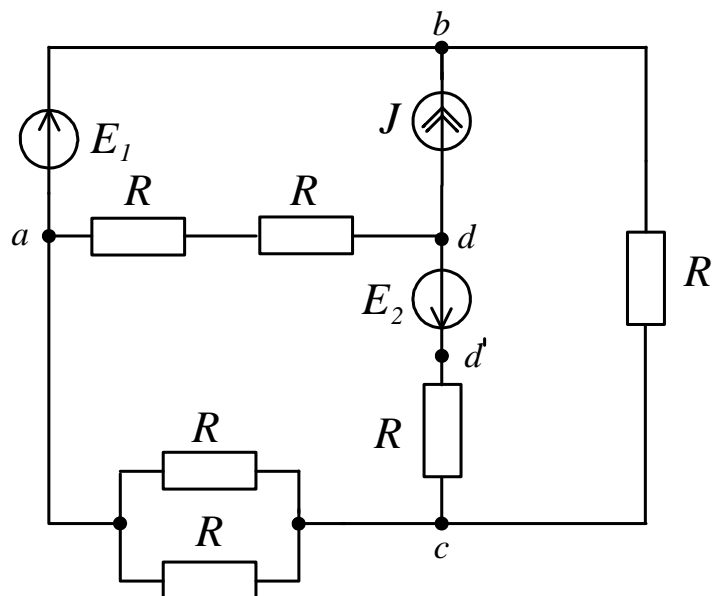


Рис.5. Схема электрической цепи

2. Преобразуем схему до трех контуров:

В ветви *da* сопротивления включены последовательно, а в ветви *ac* – параллельно, поэтому

$$R_{da} = R + R = 2R = 2 \cdot 110 = 220 \text{ Ом} \quad ;$$

$$R_{ac} = \frac{R \cdot R}{R + R} = \frac{R}{2} = \frac{110}{2} = 55 \text{ Ом}$$

1. Выбираем положительные направления токов. В ветвях, содержащих ЭДС – по направлению ЭДС, в остальных ветвях – произвольно. Расчетная схема электрической цепи с указанными направлениями токов в ветвях и напряжением на источнике тока приведена на рис.6.

4. В общем (буквенном) виде составляем полную систему уравнений состояния цепи по законам Кирхгофа для расчета токов всех ветвей и напряжения на источнике тока.

Схема содержит $N_Y = 4$ узла и $N_B = 6$ ветвей. Следовательно, по первому закону Кирхгофа можно составить: $N_Y - 1 = 4 - 1 = 3$ независимых уравнения, а по второму закону Кирхгофа: $N_B - N_Y + 1 = 6 - 4 + 1 = 3$ независимых уравнения.

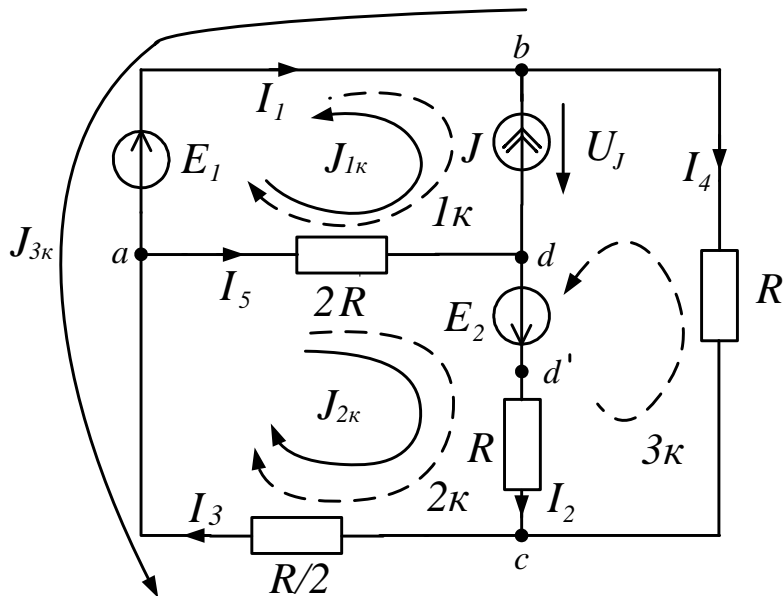


Рис.6. Расчетная схема

Узел **b**: $I_1 - I_4 = -J$

Узел **c**: $I_2 + I_4 - I_3 = 0$

Узел **a**: $I_3 - I_1 - I_5 = 0$

Контур 1: $U_J - I_5 \cdot 2R = E_1$

Контур 2: $I_2 \cdot R + I_3 \cdot \frac{R}{2} + I_5 \cdot 2R = E_2$

Контур 3: $I_2 \cdot R - I_4 \cdot R + U_J = E_2$

С помощью программы MATCAD производим расчет уравнений в матричной форме:

$$\mathbf{a} := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -220 & 1 \\ 0 & 110 & 55 & 0 & 220 & 0 \\ 0 & 110 & 0 & -110 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \mathbf{b} := \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 0 \\ 100 \\ 50 \\ 50 \end{pmatrix} \quad \mathbf{i} := \mathbf{a}^{-1} \cdot \mathbf{b} \quad \mathbf{i} = \begin{pmatrix} -1.009 \\ -1.155 \\ -0.164 \\ 0.991 \\ 0.845 \\ 286 \end{pmatrix}$$

Значение токов ветвей схемы и напряжение на источнике тока:

$$I_1 = -1.009 \text{ A}, I_2 = -1.155 \text{ A}, I_3 = -0.164 \text{ A}, I_4 = 0.991 \text{ A},$$

$$I_5 = 0.845 \text{ A}, U_J = 286 \text{ B}$$

5. Методом контурных токов определяем токи в ветвях.

Выбираем независимые контуры. В рассматриваемой схеме их три (рис.6). При этом, поскольку ветвь **bd** содержит идеальный источник тока, эта ветвь может входить только в один контур. Ток этого контура равен току источника: $J_{2k} = J = 2 \text{ A}$.

Для остальных контурных токов составляем уравнения:

$$\begin{cases} J_{2k}(2R + R + \frac{R}{2}) + J_{1k}2R - J_{3k}\frac{R}{2} = E_2 \\ J_{3k}(R + \frac{R}{2}) + J_{1k} \cdot 0 - J_{2k}\frac{R}{2} = -E_1 \end{cases}$$

После переноса в правую часть постоянных коэффициентов уравнения примут вид:

$$\begin{cases} J_{2k}(2R + R + \frac{R}{2}) - J_{3k}\frac{R}{2} = E_2 - J_{2k}2R \\ -J_{2k}\frac{R}{2} + J_{3k}(R + \frac{R}{2}) = -E_1 \end{cases}$$

Численно получим:

$$\begin{cases} 385J_{2k} - 55J_{3k} = -390 \\ -55J_{2k} + 165J_{3k} = -100 \end{cases}$$

В матричной форме уравнения будут иметь вид:

$$\begin{pmatrix} 385 & -55 \\ -55 & 165 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} J_{2k} \\ J_{3k} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -390 \\ -100 \end{pmatrix}$$

После расчета получим:

$$J_{2k} = -1.155 \text{ A}; J_{3k} = -0.991 \text{ A}.$$

Определяем токи ветвей:

$$I_1 = -J_{1k} - J_{3k} = -2 + 0.991 = -1.009 \text{ A};$$

$$I_2 = J_{2k} = -1.155 \text{ A};$$

$$I_3 = J_{2k} - J_{3k} = -1.155 + 0.991 = -0.164 \text{ A};$$

$$I_4 = -J_{3k} = 0.991 \text{ A};$$

$$I_5 = J_{1k} + J_{2k} = 2 - 1.155 = 0.845 \text{ A}.$$

Согласно второму закону Кирхгофа,

$$U_J - I_5R + I_1 \cdot 0 = E_1,$$

Отсюда

$$U_J = I_5R + E_1 = 0.845 \cdot 220 + 100 = 286 \text{ B}.$$

6. Определим токи в ветвях схемы методом узловых потенциалов. Между узлами **a** и **b** включена ветвь с идеальным источником ЭДС без сопротивления. Поэтому в качестве базисного ($\varphi = 0$) удобно принять узел **a**, тогда $\varphi_a = 0$; $\varphi_b = E_1 = 100 \text{ В}$.

Для узлов **c** и **d** составляем узловые уравнения:

$$\begin{cases} \varphi_c \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{2}{R} \right) - \varphi_d \frac{1}{R} - \varphi_b \frac{1}{R} = \frac{E_2}{R} \\ -\varphi_c \frac{1}{R} + \varphi_d \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{2R} \right) = -J - \frac{E_2}{R} \end{cases}$$

Перенеся слагаемое $\varphi_b \frac{1}{R}$ в правую часть уравнения и подставив известные числовые значения, получаем:

$$\begin{cases} \varphi_c \left(\frac{1}{110} + \frac{1}{110} + \frac{2}{110} \right) - \varphi_d \frac{1}{110} = \frac{50}{110} + \frac{100}{110} \\ -\varphi_c \frac{1}{110} + \varphi_d \left(\frac{1}{110} + \frac{1}{220} \right) = -2 - \frac{50}{110} \end{cases}$$

В матричной форме уравнения будут иметь вид:

$$\begin{pmatrix} 0.03636 & -0.00909 \\ -0.00909 & 0.0136363 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \varphi_c \\ \varphi_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.3636 \\ -2.4545 \end{pmatrix}$$

После расчета получим:

$$\varphi_c = -9 \text{ В}, \varphi_d = -186 \text{ В}$$

Токи в ветвях схемы определяются по обобщенному закону Ома:

$$I_2 = \frac{\varphi_d - \varphi_c + E_2}{R} = \frac{-186 + 9 + 50}{110} = -1.154 \text{ А}$$

$$I_3 = \frac{2 \cdot \varphi_c}{R} = \frac{2(-9)}{110} = -0.163 \text{ А}$$

$$I_4 = \frac{\varphi_b - \varphi_c}{R} = \frac{100 + 9}{110} = 0.991 \text{ А}$$

$$I_5 = -\frac{\varphi_d}{2R} = \frac{186}{220} = 0.845 \text{ А}$$

$$U_J = \varphi_b - \varphi_d = 100 + 186 = 286 \text{ В}$$

Ветвь **ab** содержит только одну ЭДС E_1 и проводимость этой ветви равна ∞ , поэтому ток I_1 невозможно определить через потенциалы узлов. Для узла **a** составим уравнение по первому закону Кирхгофа:

$$I_1 = I_3 - I_5 = -0.163 - 0.845 = -1.008 \text{ А}.$$

6. Составляем уравнение баланса мощности.

Мощность источников:

$$P_u = E_1 I_1 + E_2 I_2 + U_J J = 100(-1.009) + 50(-1.155) + 286 \cdot 2 = 413.35 \text{ Вт}$$

Мощность потребителей:

$$P_n = I_2^2 R + I_3^2 \frac{R}{2} + I_4^2 R + I_5^2 2R =$$

$$(-1.155)^2 \cdot 110 + (-0.164)^2 \cdot 55 + 0.991^2 \cdot 110 + 0.845^2 \cdot 220 = 413.336 \text{ Вт}$$

Погрешность расчета (небаланс) составила

$$\delta = \left| \frac{P_u - P_n}{P_u} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{413.36 - 413.336}{413.36} \right| \cdot 100\% = 0,0058\% .$$

Таким образом, небаланс в пределах допуска ($\delta \leq 1\%$).

8. Определим ток I_5 в ветви с сопротивлением $2R$ методом эквивалентного генератора.

Изобразим схему относительно ветви **ad** в виде эквивалентного генератора в режиме холостого хода (рис.7).

Из схемы рис.7 определим ЭДС эквивалентного генератора

$$E_\Gamma = U_{XX} .$$

Согласно второму закону Кирхгофа, $U_{XX} - JR + I_{3XX} \cdot \frac{R}{2} = E_2$,

$$\text{откуда: } E_\Gamma = U_{XX} = E_2 + JR - I_{3XX} \cdot \frac{R}{2}$$

Для определения тока I_{3XX} воспользуемся методом контурных то-

$$\text{ков: } J_{1K} = J = 2 \text{ А, } J_{2K} \left(R + \frac{R}{2} \right) + J_{1K} R = E_1$$

Подставляя численные значения, получим:

$$I_{3XX} = J_{2K} = \frac{E_1 - J_{1K} R}{R + R/2} = \frac{110 - 2 \cdot 110}{110 + 55} = -0.727 \text{ А, тогда}$$

$$E_\Gamma = U_{XX} = 50 + 2 \cdot 110 + 0.727 \cdot 55 = 310 \text{ В}$$

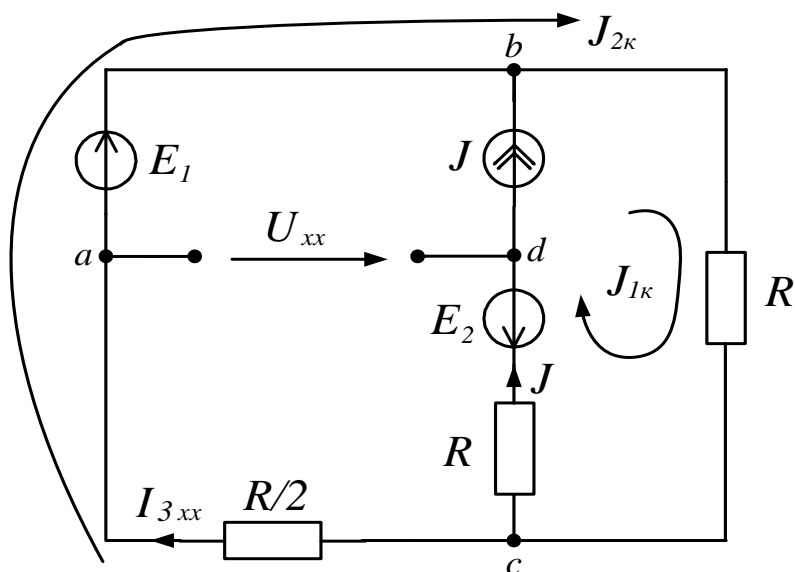


Рис.7. Эквивалентный генератор в режиме холостого хода

Для определения R_{Γ} рисуем вспомогательную схему (рис.8), в которой источники ЭДС замкнуты, а источники тока разомкнуты.

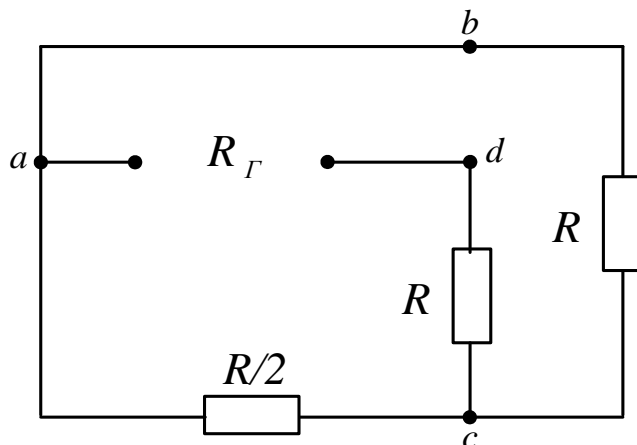


Рис.8. К определению сопротивления эквивалентного генератора

Из расчета схемы получаем:

$$R_{\Gamma} = R + \frac{R \cdot \frac{R}{2}}{R + \frac{R}{2}} = 110 + \frac{110 \cdot 55}{110 + 55} = 146.66 \text{ Ом.}$$

По формуле Тевенена-Гельмгольца определяем ток в сопротивлении нагрузки:

$$I_5 = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + 2R} = \frac{310}{146.66 + 220} = 0.845 \text{ А}$$

Ток короткого замыкания эквивалентного генератора определится как

$$I_{K3} = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma}} = \frac{310}{146.66} = 2.113 \text{ A.}$$

Определим ток I_5 графически. Для этого построим в одних осях внешнюю характеристику эквивалентного генератора и вольтамперную характеристику нагрузки (сопротивления $2R$). Внешняя характеристика является линейной и пересекает оси координат в точках U_{xx} и I_{K3} .

Вольтамперная характеристика нагрузки также линейна и строится по закону Ома: $U_5 = I_5 \cdot 2R$. При этом достаточно задать два значения тока, например $I_5 = 0$ и $I_5 = 1A$.

Точка пересечения характеристик будет рабочей точкой генератора, нагруженного на сопротивление $2R$, а ее проекция на оси координат – искомыми током и напряжением (рис.9). Получаем графические значения $U_5 \approx 186 \text{ B}$, $I_5 \approx 0.85 \text{ A}$.

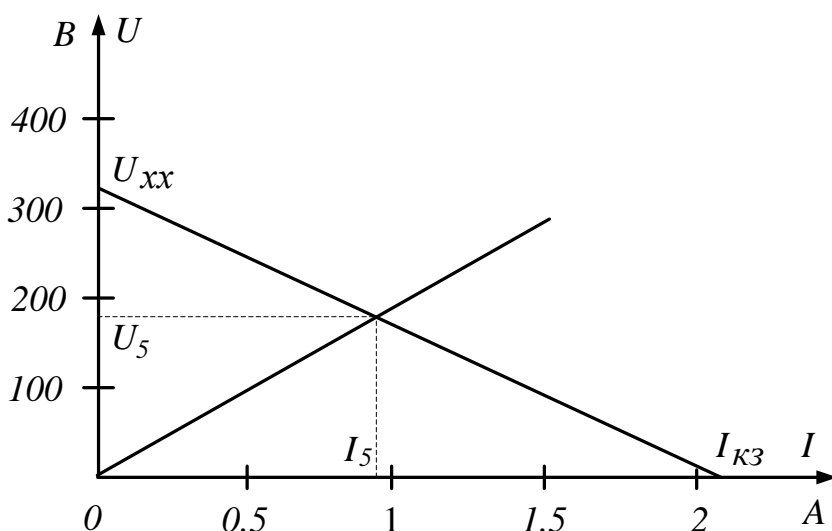


Рис.9. Графическое определение тока и напряжения на сопротивлении $2R$

Построим потенциальную диаграмму для контура *add'c* (рис.6), не содержащего источника тока.

Принимаем $\varphi_a = 0$

$$\text{Тогда } \varphi_d = \varphi_a - I_5 2R = 0 - 0.845 \cdot 220 = -185.9 \text{ B}$$

$$\varphi_{d'} = \varphi_d + E_2 = -185.9 + 50 = -135.9 \text{ B}$$

$$\varphi_c = \varphi_{d'} - I_2 R = -135.9 + 1.155 \cdot 110 = -8.85 \text{ B}$$

$$\varphi_a = \varphi_c - I_3 \frac{R}{2} = -8.85 + 0.164 \cdot 55 \approx 0 \text{ B}$$

Диаграмма приведена на рис.10.

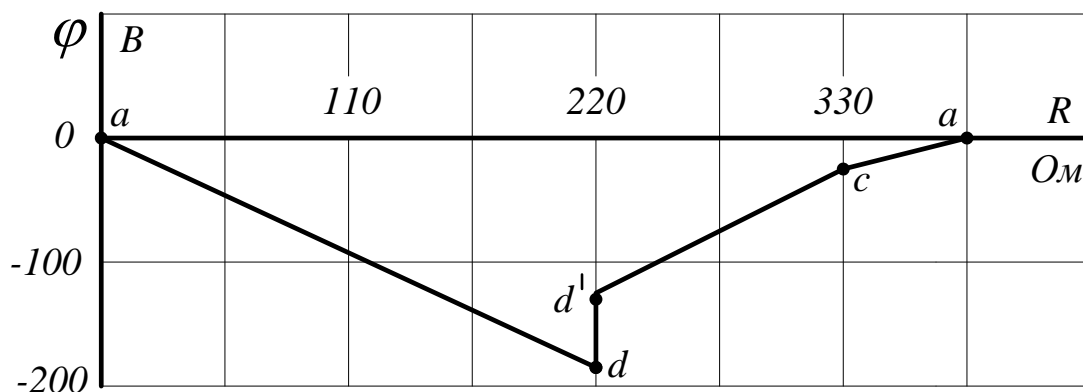


Рис.10. Потенциальная диаграмма для контура $a d d' c a$

7. Методические указания к выполнению расчетно-графической работы №2.

1. Изобразим схему электрической цепи для условного варианта, рассмотренного в методических указаниях к заданию №1 (рис.11).

2. В общем (буквенном) виде составляем полную систему уравнений состояния цепи по законам Кирхгофа для расчета токов всех ветвей и напряжения на источнике тока.

Схема содержит $N_v = 4$ узла и $N_B = 7$ ветвей. Следовательно, по первому закону Кирхгофа можно составить $N_v - 1 = 4 - 1 = 3$ независимых уравнения, а по второму закону Кирхгофа $N_B - N_v + 1 = 7 - 4 + 1 = 4$ независимых уравнения.

В индуктивных элементах токи $i_2(t), i_3(t)$ ориентированы одинаковым образом относительно одноименных зажимов, обозначенных звёздочками, поэтому имеем вариант **согласного включения**.

$$\text{Узел } a: \quad i_3 - i_1 - i_5 = 0$$

$$\text{Узел } b: \quad i_1 - i_{R4} - i_{C4} = -J$$

$$\text{Узел } d: \quad i_5 - i_2 = J$$

$$\text{Контур 1:} \quad U_J - i_5 2R = e_1$$

$$\text{Контур 2:} \quad i_5 2R + i_2 R + L \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_3}{dt} + i_3 \frac{R}{2} + L \frac{di_3}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = e_2$$

$$\text{Контур 3:} \quad i_2 R + L \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_3}{dt} - \frac{1}{C} \int i_{C4} dt + u_J = e_2$$

$$\text{Контур 4:} \quad \frac{1}{C} \int i_{C4} dt - i_{R4} R = 0$$

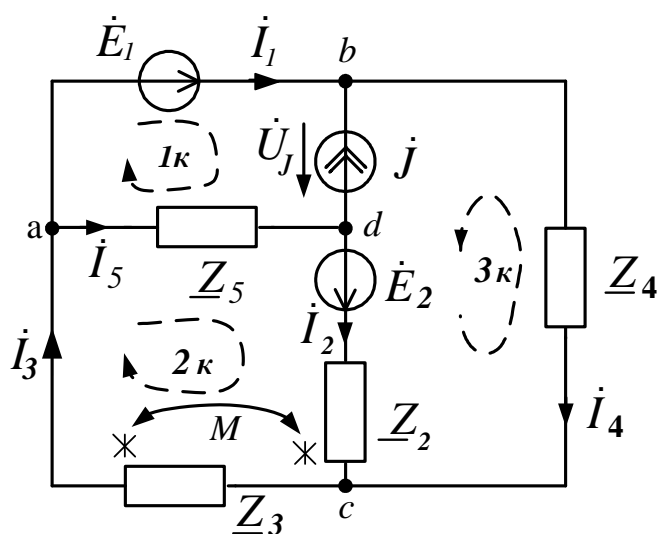


Рис.12. Расчетная комплексная схема замещения электрической цепи

4. Составляем систему уравнений в комплексной форме по законам Кирхгофа для расчета токов ветвей и напряжения на источнике тока:

Узел **b**: $\dot{I}_1 - \dot{I}_4 = -\dot{J}$

Узел **c**: $\dot{I}_2 + \dot{I}_4 - \dot{I}_3 = 0$

Узел **a**: $\dot{I}_3 - \dot{I}_1 - \dot{I}_5 = 0$

Контур 1: $\dot{U}_J - \dot{I}_5 2R = \dot{E}_1$

Контур 2: $\dot{I}_2 \underline{Z}_2 + \dot{I}_3 jX_M + \dot{I}_3 \underline{Z}_3 + \dot{I}_2 jX_M + \dot{I}_5 \underline{Z}_5 = \dot{E}_2$

Контур 3: $\dot{I}_2 \underline{Z}_2 + \dot{I}_3 jX_M - \dot{I}_4 \underline{Z}_4 + \dot{U}_J = \dot{E}_2$

Подставляя численные значения, получим:

Узел **b**: $\dot{I}_1 - \dot{I}_4 = -\dot{J}$

Узел **c**: $\dot{I}_2 + \dot{I}_4 - \dot{I}_3 = 0$

Узел **a**: $\dot{I}_3 - \dot{I}_1 - \dot{I}_5 = 0$

Контур 1: $\dot{U}_J - \dot{I}_5 220 = j100$

Контур 2: $\dot{I}_2(110 + j165) + \dot{I}_3(55 + j165) + \dot{I}_5 220 = 35.35 - j35.35$

Контур 3: $\dot{I}_2(110 + j110) + \dot{I}_3 j55 - \dot{I}_4(55 - j55) + \dot{U}_J = 35.35 - j35.35$

С помощью программы MATCAD производим расчет уравнений в матричной форме:

$$a := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -220 & 1 \\ 0 & 110 + 165i & 55 + 165i & 0 & 220 & 0 \\ 0 & 110 + 110i & 55i & -55 + 55i & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad b := \begin{pmatrix} -1.732 - i \\ 0 \\ 0 \\ 100i \\ 35.35 - 35.35i \\ 35.35 - 35.35j \end{pmatrix}$$

$$d = \begin{pmatrix} -1.322 + 0.931i \\ -0.625 - 0.579i \\ -0.215 + 1.352i \\ 0.41 + 1.931i \\ 1.107 + 0.421i \\ 243.538 + 192.623j \end{pmatrix} \quad d := a^{-1} \cdot b$$

Следует учесть, что мнимая единица в программе MATCAD обозначается как i вместо обозначения j , применяемого в электротехнике.

Значение токов ветвей схемы и напряжение на источнике тока в алгебраической и в показательной формах:

$$\dot{I}_1 = -1.322 + j0.931 = 1.617e^{j144.8^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{I}_2 = -0.625 - j0.579 = 0.852e^{-j137.2^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{I}_3 = -0.215 + j1.352 = 1.369e^{j99^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{I}_4 = 0.41 + j1.931 = 1.974e^{j78^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{I}_5 = 1.107 + j0.42 = 1.183e^{j20.7^\circ} \text{ A}$$

$$\dot{U}_J = 243.358 + j192.623 = 310.5e^{j38.34^\circ} \text{ B}$$

5. Составим баланс активной и реактивной мощностей.

Полная мощность источников составит:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{II} &= P_{II} + jQ_{II} = \dot{E}_1 \dot{I}_1^* + \dot{E}_2 \dot{I}_2^* + \dot{U}_J \dot{J}^* = \\ &= j100(-1.322 - j0.931) + (35.35 - j35.35)(-0.625 + j0.579) + \\ &+ (243.538 + j192.623)(1.732 - j1) = 705.905 + j0.446 \text{ ВА} \end{aligned}$$

Здесь i^* – сопряженный комплекс тока.

Таким образом, активная мощность источников энергии составит $P_{II} = 705.905 \text{ Вт}$; реактивная мощность $Q_{II} = 0.446 \text{ Вар}$.

Активная мощность потребителей:

$$\begin{aligned} P_{II} &= I_2^2 R + I_3^2 \frac{R}{2} + I_4^2 R_4 + I_5^2 2R = \\ &= 0.852^2 \cdot 110 + 1.369^2 \cdot 55 + 1.974^2 \cdot 55 + 1.183^2 \cdot 220 = 703.13 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Реактивная мощность потребителей при согласном включении индуктивностей с токами \dot{I}_2, \dot{I}_3 :

$$\begin{aligned}
Q_{II} &= I_2^2 X_L + I_3^2 X_L - I_4^2 X_{C4} + 2I_2 I_3 X_M \cos(\psi_2 - \psi_3) = \\
&= 0.852^2 \cdot 110 + 1.369^2 \cdot 110 - 1.974^2 \cdot 55 + \\
&+ 2 \cdot 0.852 \cdot 1.369 \cdot 55 \cdot \cos(-137.2^\circ - 99^\circ) = 0.435 \text{ var}
\end{aligned}$$

Погрешность расчета (небаланс) составила:

по активной мощности

$$\delta_P = \left| \frac{P_{II} - P_{II}}{P_{II}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{705.905 - 705.13}{705.905} \right| \cdot 100\% = 0.11\%$$

по реактивной мощности

$$\delta_Q = \left| \frac{Q_{II} - Q_{II}}{Q_{II}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{0.446 - 0.435}{0.446} \right| \cdot 100\% = 2.4\%$$

Таким образом, небаланс как по активной, так и по реактивной мощности в пределах допуска ($\delta \leq 3\%$).

6. Сделаем развязку индуктивной связи и определим ток \dot{I}_5 в сопротивлении $2R$ методом эквивалентного генератора. На рис.13 представлена схема опыта холостого хода с развязкой индуктивной связи при подключении индуктивностей к узлу с разноименными зажимами.

Напряжение \dot{U}_{XX} определим по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned}
\dot{U}_{XX} &= \dot{E}_2 + \dot{J}(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_M) - \dot{I}'_1(\underline{Z}_3 + \underline{Z}_M) = 35.35 - j35.35 + \\
&+ 2e^{j30^\circ} \cdot (110 + j165) - 2.54e^{j104.54^\circ} \cdot (55 + j165) = \\
&= 501.59 + j330.43 = 600.646e^{j33.37^\circ} \text{ В}
\end{aligned}$$

Ток \dot{I}'_1 определим методом контурных токов (рис.13):

$$\dot{J}_{1K} = \dot{J} = 2e^{j30^\circ} \text{ А}$$

$\dot{J}_{2K}(\underline{Z}_3 + \underline{Z}_M + \underline{Z}_4 - \underline{Z}_M) + \dot{J}_{1K}(\underline{Z}_4 - \underline{Z}_M) = \dot{E}_1$, подставляя
численные значения, получим:

$$\dot{J}_{2K}(110 + j55) = j100 - 2e^{j30^\circ} \cdot (55 - j110)$$

$$\dot{I}'_1 = \dot{J}_{2K} = \frac{312.377e^{j131.1^\circ}}{122.983e^{j26.56^\circ}} = 2.54e^{j104.54^\circ} \text{ А}$$

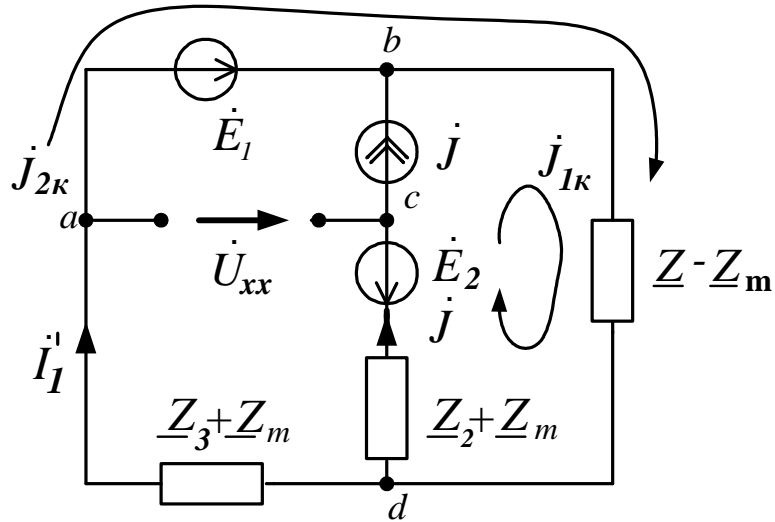


Рис.13. Схема опыта холостого хода

Для определения сопротивления эквивалентного генератора Z_Γ рисуем вспомогательную схему, в которой шунтируем источники ЭДС и размыкаем источники тока (рис.14):

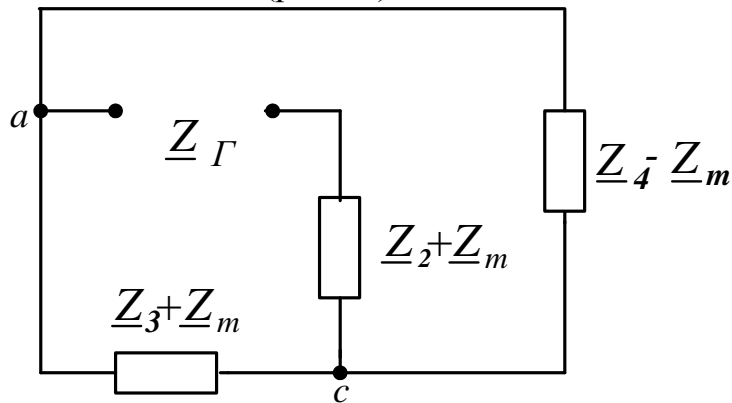


Рис.14. К определению сопротивления эквивалентного генератора

$$Z_\Gamma = Z_2 + Z_M + \frac{(Z_3 + Z_M) \cdot (Z_4 - Z_M)}{Z_3 + Z_4} = 110 + j165 +$$

$$+ \frac{(55 + j165) \cdot (55 - j110)}{110 + j55} = 275 + j100 \text{ Ом}$$

По формуле Тевенена –Гельмгольца определяем ток в нагрузке:

$$i_5 = \frac{\dot{U}_{xx}}{Z_\Gamma + 2R} = \frac{600.646e^{j33.37^\circ}}{275 + j100 + 220} = 1.189e^{j21.95^\circ} \text{ А}$$

7. Определить показание вольтметра, включенного параллельно ветви №6.

$U_{L2} = I_2 X_L = 0.852 \cdot 110 = 93.72 \text{ В}$ (вектор \dot{U}_{L2} опережает вектор \dot{I}_2 на 90°);

$U_{M2} = I_3 X_M = 1.369 \cdot 55 = 73.5 \text{ В}$ (вектор \dot{U}_{M2} при согласном включении опережает вектор \dot{I}_3 на 90°);

$U_{R2} = I_2 R = 0.852 \cdot 110 = 93.72 \text{ В}$ (вектор \dot{U}_{R2} совпадает с вектором \dot{I}_2 по фазе);

$U_{R5} = I_5 2R = 1.183 \cdot 220 = 260.26 \text{ В}$ (вектор \dot{U}_{R5} совпадает с вектором \dot{I}_5 по фазе);

$U_{L3} = I_3 X_L = 1.369 \cdot 110 = 150.6 \text{ В}$ (вектор \dot{U}_{L3} опережает вектор \dot{I}_3 на 90°);

$U_{M3} = I_2 X_M = 0.852 \cdot 55 = 46.86 \text{ В}$ (вектор \dot{U}_{M3} при согласном включении опережает вектор \dot{I}_2 на 90°);

$U_{R3} = I_3 \frac{R}{2} = 1.369 \cdot 55 = 75.3 \text{ В}$ (вектор \dot{U}_{R3} совпадает с вектором \dot{I}_3 по фазе).

Вектора токов и ЭДС строятся со своими углами:

$$\dot{I}_2 = 0.852 e^{-j137.2^\circ} \text{ А}, \quad \dot{I}_3 = 1.369 e^{j99^\circ} \text{ А}, \quad \dot{I}_5 = 1.183 e^{j20.7^\circ} \text{ А}, \\ \dot{E}_2 = 50 e^{-j45^\circ} \text{ В}.$$

Все вектора токов строятся из начала координат комплексной плоскости, а для построения топографической диаграммы напряжений за нулевой потенциал можно принять любую точку схемы, например точку **с**, как принято в данном примере.

Примечание:

а) Если рассматриваемый контур содержит ветвь с параллельно включенными R и C , то при построении векторной диаграммы применяется эквивалентное преобразование данной ветви в последовательное соединение R_3 и C_3 . В данном примере (рис.15б)

$$\underline{Z}_4 = \frac{R(-jX_C)}{R - jX_C} = R_4 - jX_{C4} = \frac{110(-j110)}{110 - j110} = 55 - j55 \text{ Ом}$$

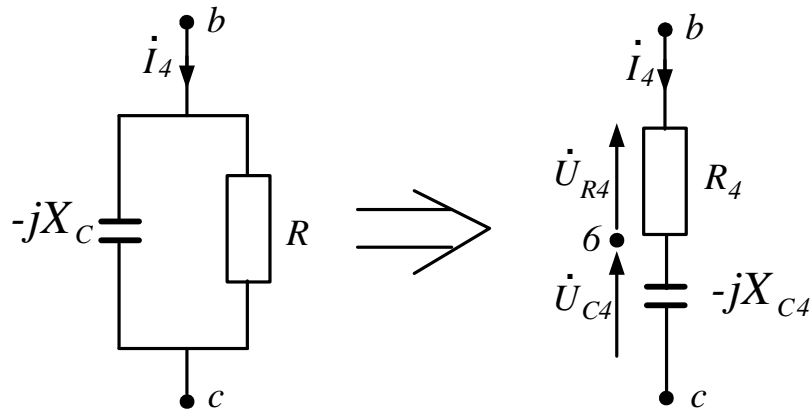


Рис.15 б. Схема эквивалентного преобразования параллельного в последовательное соединение

$U_{C4} = I_4 X_{C4} = 1.974 \cdot 55 = 108.57 \text{ В}$ (вектор \dot{U}_{C4} отстает от вектора \dot{I}_4 на 90° и направлен из точки c в точку $\mathbf{б}$);

$U_{R4} = I_4 R_4 = 1.974 \cdot 55 = 108.57 \text{ В}$ (вектор \dot{U}_{R4} совпадает с вектором \dot{I}_4 по фазе и направлен из точки $\mathbf{б}$ в точку b)

б) Если рассматриваемый контур содержит ветвь с источником тока, то вектор напряжения на источнике тока строится со своим углом и направлен по правилу векторного вычитания в точку с более высоким потенциалом. В данном примере (рис.15в) вектор напряжения $\dot{U}_J = 310e^{j38.34^\circ} \text{ В}$ направлен из точки d в точку b .

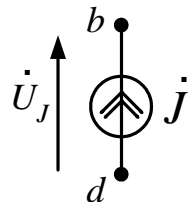


Рис.15в. К построению вектора напряжения на источнике тока

Лучевая векторная диаграмма токов и топографическая векторная диаграмма напряжений приведена на рис.16.

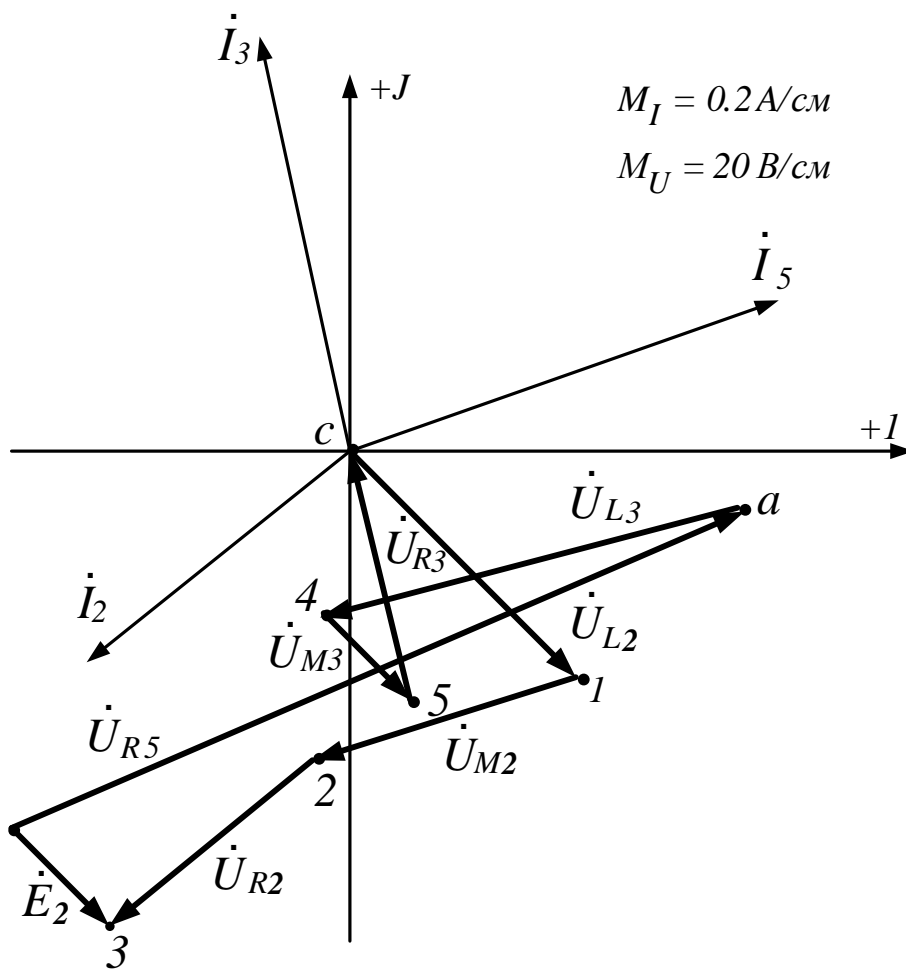


Рис.16. Лучевая диаграмма токов и топографическая диаграмма напряжений

8. Методические указания к выполнению расчетно-графической работы №3.

Методы расчета переходных процессов подробно изложены в [1,2]. Допустим, что четырехзначный номер задания соответствует следующей схеме из списка на рис.3 и ее параметрам из таблицы №4 (рис.17). Необходимо определить напряжение переходного процесса $u(t)$.

L	R	J	α
Гн	Ом	А	град
0.5	30	4	60

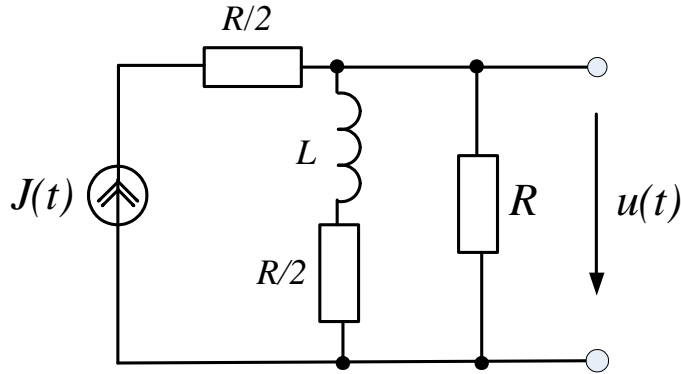


Рис.17. Схема для расчета переходного процесса

а) Расчёт переходного процесса в заданной схеме классическим методом при включении в момент времени $t = 0_+$ постоянного источника тока $J(t) = J$.

4. Запишем выражение для напряжения переходного процесса в цепи первого порядка: $u(t) = u_{np} + u_{св} = u_{np} + Ae^{pt}$
5. Определяем ННУ: $i_L(0_-) = i_L(0_+) = 0$, поскольку до коммутации $J(0_-) = 0$.
6. Для определения ЗНУ $u(0_+)$ в момент времени $t = 0_+$ рисуем схему, в которой заменяем индуктивность на источник тока с величиной $i_L(0)$ (рис.18).
7. С учетом того, что $i_L(0) = 0$, получим $u(0_+) = JR = 4 \cdot 30 = 120 \text{ В}$

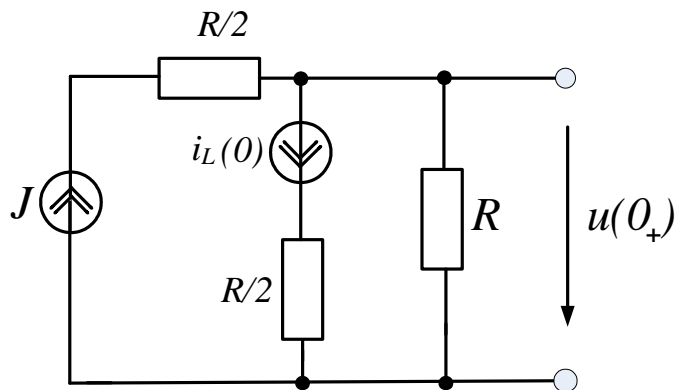


Рис.18. Схема для расчета ЗНУ

8. Принужденная составляющая соответствует значению напряжения в установившемся режиме после окончания переходного процесса, когда для постоянного тока J сопротивление индуктивности равно нулю.

$$u_{np}(t) = J \frac{R \cdot R/2}{R + R/2} = 4 \cdot \frac{30 \cdot 15}{30 + 15} = 40 \text{ В}$$

9. Корень характеристического уравнения определим из схемы на рис.19, которая получается путем замены L на pL . Ветвь с источником тока, имеющем бесконечно большое сопротивление убирается, а оставшаяся схема размыкается в любом месте. Относительно точек разрыва определяется сопротивление $Z(p) = 0$, из которого определяют корень характеристического сопротивления.

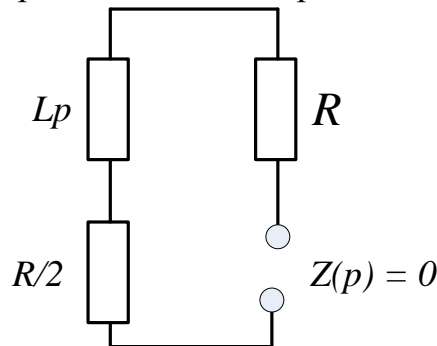


Рис.19. Схема для определения $Z(p)$

$$Z(p) = R + \frac{R}{2} + Lp = 0, \text{ отсюда } p = -\frac{3R}{2L} = -\frac{3 \cdot 30}{2 \cdot 0.5} = -90 \text{ 1/с}$$

10. Постоянную интегрирования A в выражении для свободной составляющей $u_{св}(t)$ найдем из начальных условий. При $t = 0_+$ получим $u(0_+) = u_{np} + A$, отсюда $A = u(0_+) - u_{np} = 120 - 40 = 80 \text{ В}$
11. Записываем окончательный результат:

$$u(t) = 40 + 80e^{-90t} = 40 + 80e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ В,}$$

где $\tau = \frac{1}{|p|} = \frac{1}{90} = 0.011 \text{ с}$ - постоянная времени переходного процесса.

Для расчета переходного процесса **операторным методом** составляется операторная схема замещения для цепи после коммутации, которая содержит изображения элементов обычной схемы. Метод основан на представлении интегралов и производных по времени алгебраическими функциями. Основы метода подробно изложены в [1,2], там же можно найти примеры прямого и обратного преобразований большинства используемых функций.

Изображения основных элементов цепи в операторной форме приведены в табл. №5.

На рис.20 показана операторная схема замещения исследуемой цепи после коммутации. Операторное изображение источника постоянного тока $J(t) = J$ записывается в виде $J(p) = J/p$, аналогично для источника постоянной ЭДС ННУ $i_L(0) = 0$, $e(t) = E$, $E(p) = E/p$. ННУ $i_L(0) = 0$.

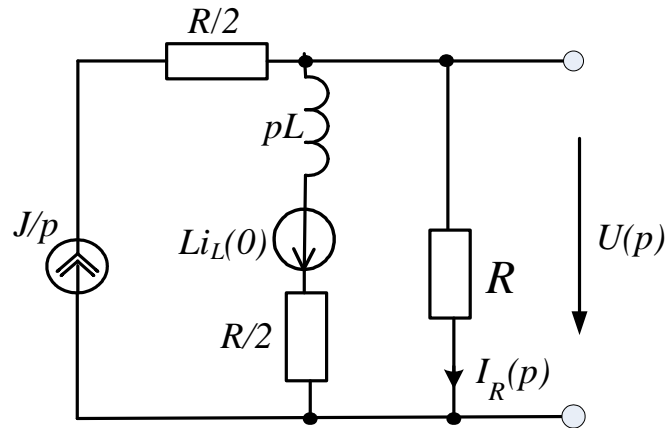


Рис.20. Операторная схема замещения

По закону Ома $U(p) = I_R(p)R$, так как $i_L(0) = 0$, то по правилу разброса $I_R(p) = \frac{J}{p} \cdot \frac{(R/2 + pL)}{R + R/2 + pL}$, окончательно получим:

$$U(p) = \frac{JR(R/2 + pL)}{p(pL + 3R/2)} = \frac{1800 + 60p}{p(0.5p + 45)} = \frac{A(p)}{p \cdot B_1(p)}.$$

По теореме разложения:

1. $B_1(p) = 0.5p + 45 = 0$, отсюда $p_1 = -90$ 1/с;
2. $B_1'(p) = (0.5p + 45)' = 0.5$;

3.
$$u(t) = \frac{A(0)}{B_1(0)} + \frac{A(p_1)}{p_1 \cdot B_1'(p_1)} \cdot e^{p_1 t} = \frac{1800}{45} + \frac{1800 + 60 \cdot (-90)}{(-90) \cdot 0.5} e^{-90t} =$$

$$= 40 + 80e^{-90t} \text{ В}$$

Построим график на интервале $0 \leq t \leq 4\tau$, где $\tau = 0.011$ с. График напряжения $u(t)$ переходного процесса, построенный с помощью программы Mathcad, показан на рис.21.

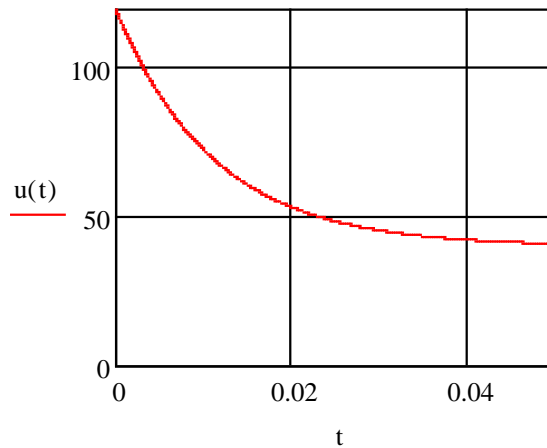


Рис.21. График напряжения переходного процесса

б) **Расчет переходного процесса в заданной схеме методом интеграла Дюамеля при воздействии прямоугольного импульса тока (рис.4.а) длительностью $t_1 = 3\tau$.**

1. Определим переходную характеристику $h(t)$. Поскольку ранее переходный процесс рассматривался при включении источника постоянного тока $J(0) = 4 \text{ A}$, а полученное выходное напряжение равнялось $U(t) = 40 + 80e^{-90t} \text{ B}$, то при включении источника тока величиной $J = 1 \text{ A}$ получим переходную характеристику:

$$h(t) = \frac{U(t)}{J} = \frac{40 + 80e^{-90t}}{4} = 10 + 20e^{-90t} \text{ Ом}$$

2. Запаздывающая переходная характеристика:

$$h(t-x) = 10 + 20e^{-90(t-x)} \text{ Ом}$$

3. Для интервала времени $0 \leq t < t_1$, интеграл Дюамеля запишется

$$u(t) = J(0) \cdot h(t) + \int_0^t J'(t) \cdot h(t-x) \cdot dx,$$

поскольку $J'(t) = 0$, поэтому

$$u(t) = J(0) \cdot h(t) = 4 \cdot (10 + 20 \cdot e^{-90t}) = 40 + 80 \cdot e^{-90t} = 40 + 80 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ B}$$

где $\tau = \frac{1}{|p|} = \frac{1}{90} = 0.011 \text{ c}$ - постоянная времени переходного процесса,

$$t_1 = 3 \cdot \tau = 0.033 \text{ c}$$

4. Для интервала времени $t \geq t_1$ получим

$$u(t) = J(0) \cdot h(t) + (J(t_1) - J(0)) \cdot h(t-t_1),$$

где $J(t_1) = 0$ - значение тока после скачка в момент времени t_1 ;

$$h(t - t_1) = 10 + 20e^{-90(t-0.033)} = 10 - 20e^{-90t} \cdot e^3 = 10 + 401.7e^{-90t} -$$

переходная характеристика, учитывающая время t_1 запаздывания скачка источника тока. Окончательно получим:

$$u(t) = 4(10 + 20e^{-90t}) + (0 - 4)(10 + 401.7e^{-90t}) = -1526.74e^{-90t} \text{ В}$$

График этой функции, построенный с помощью программы Mathcad, представлен на рис.22.

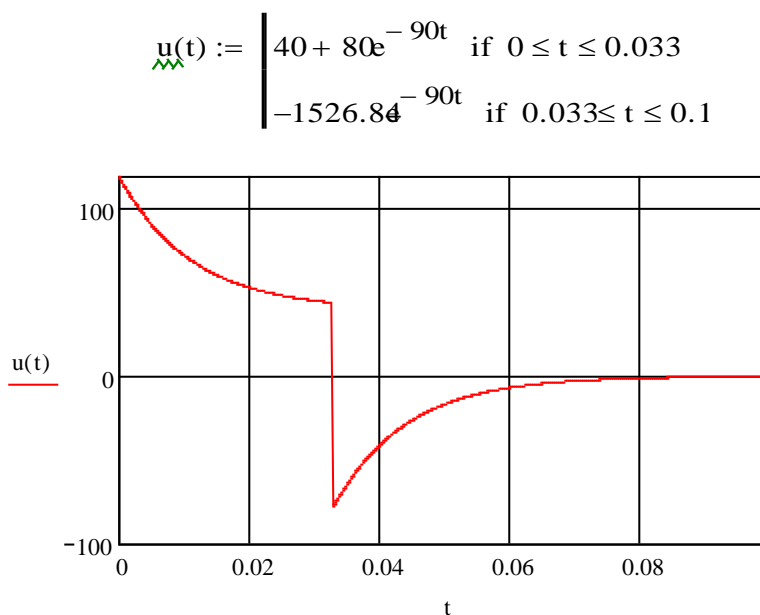


Рис.22. График напряжения переходного процесса

Расчет переходного процесса в заданной схеме методом интеграла Дюамеля при воздействии импульса тока сложной формы (рис.4.б) длительностью $t_1 = 3\tau$.

1. Запишем график тока $J(t)$ в интервале $0 \leq t < t_1$, который является отрезком прямой, ограниченной точками $(0, J(0))$ и $(t_1, 0)$. Уравнение прямой, проходящей через эти точки: $J(t) = -kt + b = -121.2t + 4 \text{ А}$,

$$\text{где } k = -\frac{J(0)}{t_1} = -\frac{4}{0.033} = -121.2 \text{ А/с}$$

2. Определим производную тока $J'(t) = J'(x) = -k = -121.2 \text{ А/с}$
3. Переходная характеристика при $J = 1 \text{ А}$: $h(t) = 10 + 20e^{-90t}$, запаздывающая переходная характеристика $h(t - x) = 10 + 20e^{-90(t-x)}$.
4. Записываем интеграл Дюамеля для интервала $0 \leq t < t_1$
Момент времени $t_1 = 0.033 \text{ с}$ не входит в верхний предел интеграла Дюамеля.

$$U(t) = J(0)h(t) + \int_0^t J'(x)h(t-x)dx = 4(10 + 20e^{-90t}) -$$

$$-121.2 \int_0^t (10 + 20e^{-90(t-x)})dx = 40 + 80e^{-90t} - 1212 \cdot t - \frac{2424}{90}e^{-90t} \cdot (e^{90t} - 1) =$$

$$= 13 - 1212t + 107e^{-90t} \text{ В}$$

5. Записываем интеграл Дюамеля для интервала $t \geq t_1$.

При $t \geq t_1$ $J(t) = 0$, поэтому $U(t)$ не будет содержать дополнительных составляющих, а в интеграле меняется верхний предел t на t_1 .

$$U(t) = J(0)h(t) + \int_0^{t_1} J'(t) \cdot h(t-x)dx = 4(10 + 20e^{-90t}) -$$

$$-121.2 \int_0^{t_1} (10 + 20e^{-90(t-x)})dx = 40 + 80e^{-90t} - 1212 \cdot t_1 - 2424e^{-90t} \cdot \left(\int_0^{t_1} e^{90x} dx \right) =$$

$$= 40 + 80e^{-90t} - 1212 \cdot 0.033 - \frac{2424}{90}e^{-90t} \cdot (e^{90 \cdot 0.033} - 1) = 80e^{-90t} -$$

$$-514e^{-90t} = -434e^{-90t} \text{ В}$$

График $U(t)$ для данного случая приведен на рис.23.

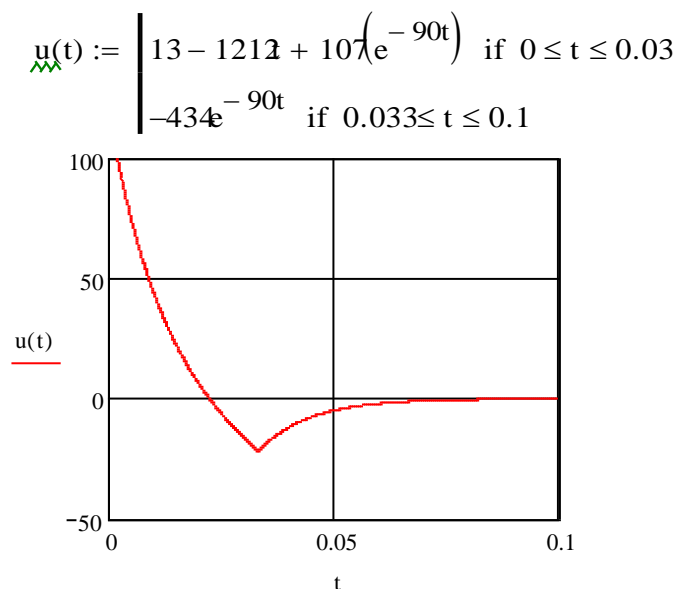


Рис.23. График напряжения переходного процесса

в) **Расчет переходного процесса в заданной схеме классическим методом при гармоническом источнике: $J(t) = J \sin(\omega t + \alpha)$ на интервале времени $0 \leq t \leq \frac{2\pi}{\omega}$.**

1. Определяем угловую частоту из условия $X_L = R$;

$$X_L = \omega L = R = 30 \text{ Ом}; \quad \omega = \frac{R}{L} = \frac{30}{0.5} = 60 \text{ рад/с};$$

2. Запишем выражение для напряжения переходного процесса в цепи первого порядка: $u(t) = u_{np} + u_{св} = u_{np} + Ae^{pt}$;

3. Определяем ННУ: $i_L(0_-) = i_L(0_+) = 0$, поскольку до коммутации $J(0_-) = 0$;

4. Для определения ЗНУ $u(0_+)$ в момент времени $t = 0_+$ рисуем схему, в которой заменяем индуктивность на источник тока с величиной $i_L(0)$, определяем также $J(0) = 4 \cdot \sin 60^\circ = 3.46 \text{ А}$ (рис.24)

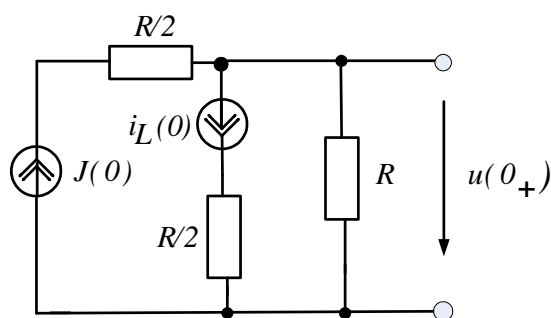


Рис. 24. Схема для расчета ЗНУ

С учетом того, что $i_L(0) = 0$, получим $u(0_+) = J(0)R = 3.46 \cdot 30 = 104 \text{ В}$;

5. Расчет принужденной составляющей ведем с помощью комплексной схемы замещения цепи после коммутации для амплитудных значений (рис.25).

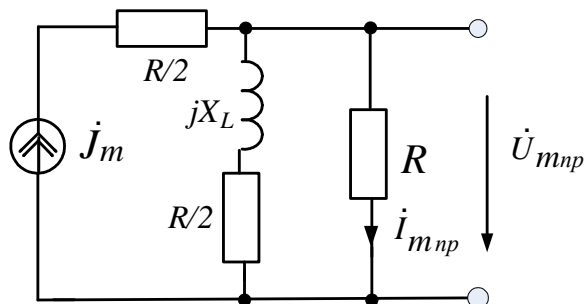


Рис. 25. Схема для расчета принужденной составляющей

По правилу разброса:

$$\dot{I}_{mnp} = \dot{J}_m \cdot \frac{R/2 + jX_L}{3R/2 + jX_L} = 4e^{j60^\circ} \cdot \frac{15 + j30}{45 + j30} = 2.48e^{j89.75^\circ} \text{ A}$$

$$\text{Тогда } \dot{U}_{mnp} = \dot{I}_{mnp} \cdot R = 2.48e^{j89.75^\circ} \cdot 30 = 74.46e^{j89.75^\circ} \text{ B}$$

Мгновенное значение напряжения $u_{np}(t) = 74.46 \sin(60t + 89.75^\circ) \text{ B}$

В момент времени $t = 0$ получим $u_{np}(0) = 74.46 \cdot \sin 89.75^\circ = 74.45 \text{ B}$

6. Корень характеристического уравнения такой же, как и для схемы, изображенной на рис.19: $p = -90 \text{ 1/c}$, постоянная времени $\tau = 0.011 \text{ c}$

7. Постоянную интегрирования A в выражении для свободной составляющей $u_{cb}(t)$ найдем из начальных условий. При $t = 0_+$ получим:

$$u(0_+) = u_{np}(0) + A, \text{ отсюда } A = u(0_+) - u_{np} = 104 - 74.45 = 29.55 \text{ B}$$

9. Записываем окончательный результат:

$$u(t) = 74.46 \sin(60t + 89.75^\circ) + 29.55e^{-90t} \text{ B}$$

Период синусоиды $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{6.28}{60} = 0.104 \text{ c}$.

График напряжения переходного процесса, построенный с помощью программы Mathcad, представлен на рис.26.

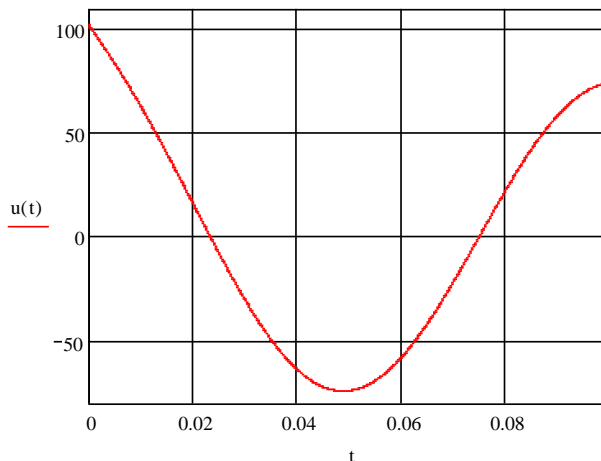


Рис.26. График напряжения переходного процесса

Список литературы

1. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 526 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1996. – 559 с.
3. Сметанина Р.Н., Носов Г.В., Исаев Ю.Н. Теоретические основы электротехники. Часть 1. – Томск: Изд. ТПУ, 2005. – 107 с.

4. Сборник задач и упражнений по ТОЭ/ Под. ред. П.А. Ионкина. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 768 с.
5. 李翰荪, 电路分析基础(上册), 高等教育出版社
6. 李翰荪, 电路分析基础(下册), 高等教育出版社
7. 阎石, 数字电子技术基础, 高等教育出版社

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	с.3
2. Тема №1.Элементы и параметры электрических цепей, методы расчета цепей постоянного тока.....	с.4
3. Терминологический словарь к теме №1.....	с.17
4. Задачи к теме №1.....	с.19
5. Тема №2.Расчет цепей с синусоидальными напряжениями и токами.....	с.22
5. Терминологический словарь к теме №2.....	с.30
6. Задачи к теме №2.....	с.32
7. Тема №3. Резонанс в цепях синусоидального тока.....	с.34
8. Терминологический словарь к теме №3.....	с.39
9. Задачи к теме №3.....	с.40
10.Тема №4. Расчет линейных электрических цепей с взаимной индуктивностью.....	с.41
11.Терминологический словарь к теме №4.....	с.46
12.Тема №5. Двухобмоточный трансформатор в линейном режиме...с.	46
13.Терминологический словарь к теме №5.....	с.48
14.Задачи к темам 4-5.....	с.48
15.Тема №6.Переходные процессы в линейных электрических цепях.....	с.49
16.Терминологический словарь к теме №6.....	с.56
17.Задачи к теме №6.....	с.58
18.Тема №7.Трехфазные цепи.....	с.59
19.Терминологический словарь к теме №7.....	с.64
20.Задачи к теме №7.....	с.65
21.РГР №1. Расчет линейной цепи постоянного тока.....	с.68
22.РГР №2. Расчет линейной цепи синусоидального тока.....	с.69
23.РГР №3. Переходные процессы в линейных электрических цепях.с.	71
24.Методические указания к выполнению РГР №1.....	с.75
25.Методические указания к выполнению РГР №2.....	с.83
26.Методические указания к выполнению РГР №3.....	с.92
27.Список литературы.....	с.100
28.Содержание.....	с.101

Учебное издание

ПУСТЫННИКОВ Сергей Владимирович
ХАН Вей
ШАНДАРОВА Елена Борисовна

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Учебное пособие


Научный редактор *кандидат технических наук,
доцент Г.В.Носов*
Компьютерная верстка *С.В.Пустынников*
Дизайн обложки *И.О. Фамилия*

Подписано к печати 05.11.2012. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».
Печать XEROX. Усл.печ.л. 9,01. Уч.-изд.л. 8,16.
Заказ . Тираж 100 экз.



Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru