

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра теоретических основ электротехники

С.В. Батюков, Л.Ю. Шилин

Электротехника с основами энергосбережения

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
для студентов специальностей «Автоматизированные системы
обработки информации», «Вычислительные машины, системы
и сети», «Искусственный интеллект»
всех форм обучения

В 2-х частях

Часть 2

Минск 2006

УДК 621.3 (075.8)
ББК 31.2 я 73
Б 28

Рецензент:
зав. кафедрой электротехники и электроники БНТУ,
канд. техн. наук И.В. Новаш

Батюков С.В.

Б 28 Электротехника с основами энергосбережения: Лаб. практикум для студ. спец. «Автоматизированные системы обработки информации», «Вычислительные машины, системы и сети», «Искусственный интеллект» всех форм обуч.: В 2 ч. Ч. 2 / С.В. Батюков, Л.Ю. Шилин. – Мн.: БГУИР, 2006. – 35 с.: ил.
ISBN 985-488-011-7 (ч. 2)

Часть вторая практикума включает цикл из трех модернизированных лабораторных работ и содержит основные теоретические положения, порядок расчета домашнего задания и последовательность выполнения с подробным иллюстрированным сопровождением и примерами расчета.

УДК 621.3 (075.8)
ББК 31.2 я 73

Часть 1 издана в БГУИР в 2005 г.

ISBN 985-488-011-7 (ч. 2)
ISBN 985-444-829-0

© Батюков С.В., Шилин Л.Ю., 2006
© БГУИР, 2006

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЯХ С СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Цель работы

Экспериментальное исследование переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами при включении или отключении источника напряжения. Определение влияния отдельных параметров на характер переходного процесса. Выбор параметров и экспериментальное исследование дифференцирующих и интегрирующих цепей.

Основные теоретические положения

Переходные процессы

В электрических цепях, содержащих накопители энергии, при включении и выключении пассивных или активных ветвей, коротких замыканиях отдельных участков, внезапных изменениях параметров и других коммутациях возникают переходные режимы.

Теоретически можно считать, что процесс коммутации происходит мгновенно, т.е. на включение, выключение или переключение цепи время не затрачивается, однако переход от исходного режима цепи к последующему установившемуся происходит не мгновенно, а в течение некоторого времени. Объясняется это тем, что каждому состоянию цепи соответствует определенный запас энергии электрических и магнитных полей, переход к новому режиму связан с нарастанием или убыванием энергии этих полей. Энергия, запасенная в магнитном поле катушки, и энергия электрического поля емкости

$$W_L = \frac{Li^2}{2}, \quad W_C = \frac{Cu^2}{2}$$

не могут изменяться скачком. Действительно, скачкообразное изменение энергии привело бы к выделению в индуктивностях и емкостях бесконечно больших мощностей, что лишено физического смысла. Отсюда вытекают два закона коммутации:

1. В ветви с индуктивностью ток в момент коммутации сохраняет то значение, которое он имел до коммутации, и изменяется именно с этого значения.

2. В ветви с емкостью напряжение (заряд) сохраняет в момент коммутации то значение, которое было до коммутации, и изменяется именно с этого значения.

Обычно принимают, что коммутация происходит в момент времени $t = 0$, тогда

$$\begin{aligned} i_L(0_-) &= i_L(0_+), \\ U_C(0_-) &= U_C(0_+), \end{aligned} \quad (13.1)$$

где $i_L(0_-)$; $U_C(0_-)$ – значения тока и напряжения до коммутации;

$i_L(0_+)$; $U_C(0_+)$ – начальные значения после коммутации.

Следует отметить, что скачкообразно могут изменяться как токи в сопротивлениях и емкостях, так и напряжения на сопротивлениях и индуктивностях.

Значения токов в индуктивностях и напряжений на емкостях в цепи в первый момент после коммутации называются независимыми начальными условиями, так как они определяются из законов коммутации по схемам до включения или выключения ключей. Все остальные токи и напряжения на элементах цепи в первый момент после коммутации определяются из расчета схемы замещения для момента времени $t = 0+$ и называются зависимыми начальными условиями.

Переходные процессы в одних случаях нежелательны и опасны (например, короткое замыкание в энергосистеме), в других случаях они представляют нормальный режим работы цепи (например, в системах автоматического регулирования, вычислительных устройствах, радиопередающих системах и т.д.).

Существуют различные методы анализа переходных процессов. В данной работе рассматривается классический метод.

Расчет переходного процесса классическим методом производится в следующем порядке:

1. Рассчитывается режим до коммутации, из которого определяются независимые начальные условия.

2. Составляется система дифференциальных уравнений, описывающая процесс в цепи после коммутации.

3. Находится общее решение системы однородных дифференциальных уравнений (свободные составляющие).

4. Находится частное решение системы неоднородных дифференциальных уравнений (установившийся режим).

5. По начальным условиям определяются постоянные интегрирования.

Характер переходного процесса определяется характером свободных составляющих, которые в свою очередь зависят от вида корней характеристического уравнения:

1. Корни вещественные неравные (отрицательные) $p_1 = -\delta_1$, $p_2 = -\delta_2$ и т.д. В этом случае

$$i_{св} = \sum_{k=1}^{k=n} A_k e^{-\delta_k t} = \sum_{k=1}^{k=n} A_k e^{-\frac{t}{\tau_k}}.$$

Переходный процесс носит аperiodический характер.

Каждая свободная составляющая имеет вид экспоненты (рис. 13.1). Время переходного процесса зависит от коэффициента затухания δ . Величина, обратная δ , называется постоянной времени τ , и представляет собой время, в течение которого значение свободной составляющей переходного процесса

уменьшится в $e=2,72$ раза. Величина τ зависит от схемы и параметров. Так, для цепи с последовательным соединением r и L $\tau = \frac{L}{r}$, а при последовательном соединении r и C $\tau = rC$.

Кривые свободных составляющих переходного процесса проще всего построить, задавая времени t значения $0, \tau, 2\tau, \dots$. Если вещественных корней несколько, то результирующая кривая получается путем суммирования ординат отдельных слагаемых (рис. 13.2).

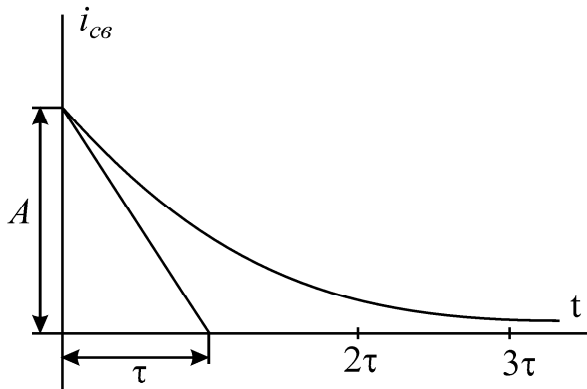


Рис.13.1

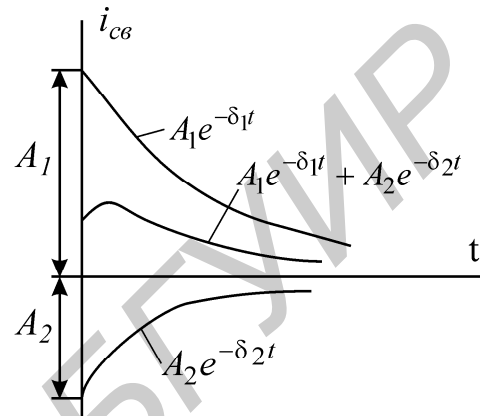


Рис.13.2

2. Корни вещественные, равные

$$p_1 = p_2 = p; \tau = \left| \frac{1}{p} \right|; i_{cs} = (A_1 + A_2 t) e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

3. Корни комплексно-сопряженные:

$$p_{1,2} = -\delta \pm j\omega_c;$$

$$i_{cs} = (A_1 \sin \omega_c t + A_2 \cos \omega_c t) e^{-\frac{t}{\tau}} = A e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_c t + \psi),$$

где

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}; \psi = \arctg \frac{A_2}{A_1}; \tau = \frac{1}{\delta}.$$

Характер переходного процесса – колебательный. Свободная составляющая имеет вид затухающей синусоиды с начальной фазой ψ . Огибающая колебаний

определяется кривой $A e^{-\frac{t}{\tau}}$. Чем больше δ , тем быстрее затухает колебательный процесс. Период свободных колебаний $T_c = \frac{2\pi}{\omega_c}$ определяется

коэффициентом ω_c при мнимой части корня и зависит от параметров цепи после коммутации. Колебательные процессы могут возникать в схемах, содержащих емкости и индуктивности, имеющие малые активные

сопротивления. Построить кривую колебательного процесса удобно, рассчитав сначала точки огибающей экспоненты, а затем определив период T_c , в экспоненту и ее зеркальное отражение вписать синусоиду, сдвинув ее на соответствующий угол относительно начала координат (рис. 13.3).

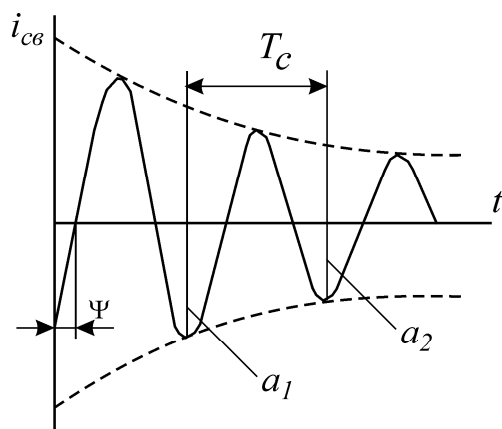


Рис.13.3

При наличии корней разного вида соответствующие выражения суммируются. Например, один корень вещественный $p_1 = -\delta_1$ и два корня комплексно-сопряженные $i_{cv} = A_1 e^{-\delta_1 t} + e^{-\delta t} (A_2 \sin \omega_c t + A_3 \cos \omega_c t)$.

Скорость затухания рассматриваемых колебаний принято оценивать декрементом или логарифмическим декрементом колебаний.

Декрементом колебаний Δ называется отношение двух амплитудных значений напряжений или токов в моменты времени t и $t + T_c$, а логарифмическим декрементом колебаний – натуральный логарифм этого

отношения $\Delta = \frac{a_1}{a_2} = e^{\delta T_c}$, т.е. логарифмический декремент колебаний это

$$\theta = \ln \frac{a_1}{a_2} = \delta T_c. \quad (13.2)$$

Дифференцирующая цепь

Дифференцирующей называется электрическая цепь, в которой выходная величина пропорциональна производной от входной величины. Простейшими дифференцирующими цепями могут служить цепи с емкостью или индуктивностью.

В цепи с емкостью

$$i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}$$

Принимая $u_c(t)$ за входную величину, а ток $i_c(t)$ – за выходную, получим дифференцирующую цепь.

В цепи с индуктивностью

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}.$$

Принимая $i_L(t)$ за входную величину, а $u_L(t)$ – за выходную, получим дифференцирующую цепь.

Использовать ток как входную или выходную величину практически затруднительно, так как в первом случае необходимо иметь стабильный источник тока, а во втором для его измерения необходимо включить последовательно дополнительное сопротивление, которое оказывает влияние на процесс. Следовательно, входной и выходной величинами целесообразно выбирать напряжения, при этом используются rC - и rL -цепи (рис. 13.4, а и б).

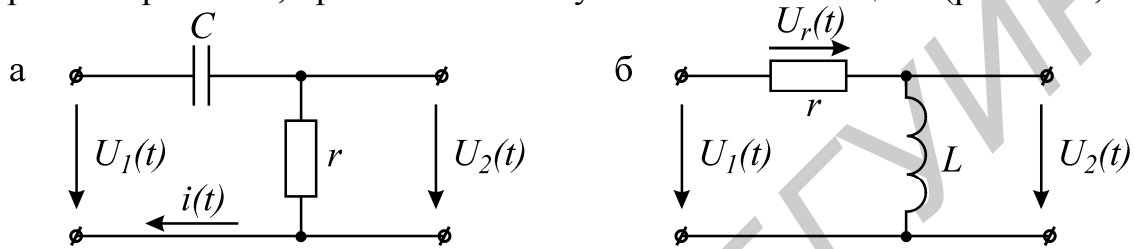


Рис.13.4

На практике широкое распространение получила rC -цепь.

Условие, при котором rC -цепь выполняет операцию дифференцирования, вытекает из уравнения

$$u_i(t) = u_c(t) + u_r(t).$$

Если принять

$$u_r(t) \ll u_c(t), \quad (13.3)$$

то

$$u_c(t) \approx u_i(t).$$

При синусоидальном входном напряжении уравнение цепи в комплексной форме

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_c + r\dot{I} = \left(r + \frac{1}{j\omega C} \right) \dot{I}.$$

По условию дифференцирования

$$r\dot{I} \ll \frac{1}{j\omega C} \dot{I},$$

тогда

$$r \ll \frac{1}{\omega C} \quad \text{или} \quad rC = \tau \ll \frac{1}{\omega}. \quad (13.4)$$

При несинусоидальной форме напряжения $U_1(t)$ условие дифференцирования должно быть выполнено для всех гармонических составляющих входного сигнала. При этом условием дифференцирования является

$$rC \ll \frac{1}{\omega_B},$$

где ω_B – частота наивысшей гармоники, которой нельзя пренебречь.

Например, кривая напряжения прямоугольной формы определяется рядом

$$u(t) = \frac{4U_m}{\pi} \left[\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \dots \right] \quad (13.5)$$

Наивысшей расчетной частотой обычно полагают частоту 11-й гармоники. Поэтому

$$rC \leq \frac{1}{11\omega}. \quad (13.6)$$

Идеальное дифференцирование прямоугольного импульса показано на рис. 13.5 а, б. Амплитуда выходного сигнала $u_2(t)$ бесконечно велика.

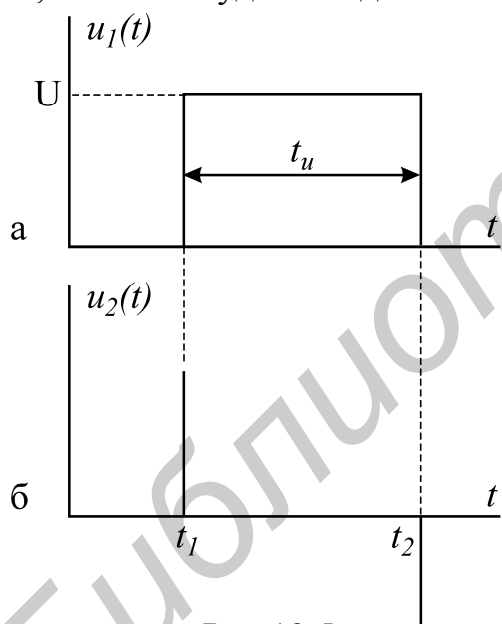


Рис.13.5

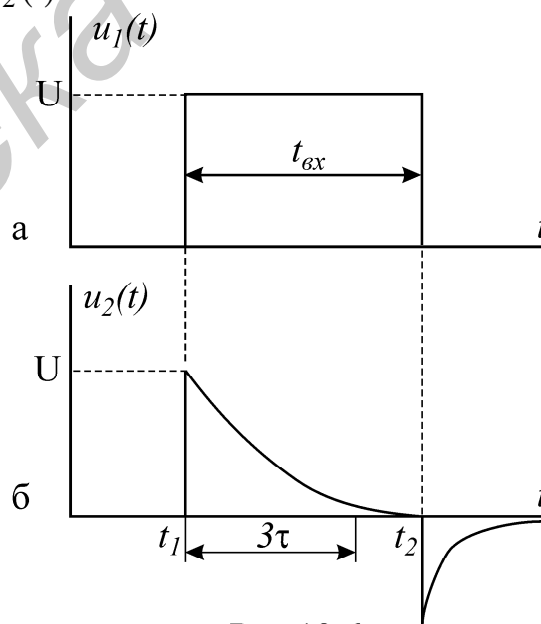


Рис.13.6

График напряжения $u_2(t)$ на выходе реальной дифференцирующей цепи показан на рис. 13.6, б. Напряжение $u_2(t)$ представляет собой импульсы экспоненциальной формы с чередующейся полярностью. За длительность выходного импульса принимают время, равное утроенному значению постоянной времени цепи $t_{u \text{ вых}} \approx 3\tau$. Амплитуда импульсов равна величине входного напряжения. Сравнение временных диаграмм реальной и идеальной дифференцирующей цепи (рис. 13.5, б и 13.6, б) показывает, что при

уменьшении τ длительность импульсов $u_2(t)$ сокращается и кривая $u_2(t)$ стремится по форме к производной входного напряжения. Дифференцирующая цепь называется еще укорачивающей, так как длительность выходных импульсов значительно меньше, чем входных.

Интегрирующая цепь

Интегрирующей называется электрическая цепь, в которой выходная величина пропорциональна интегралу от входной величины (рис. 13.7, а, б). Широкое применение на практике получила интегрирующая rC -цепь.

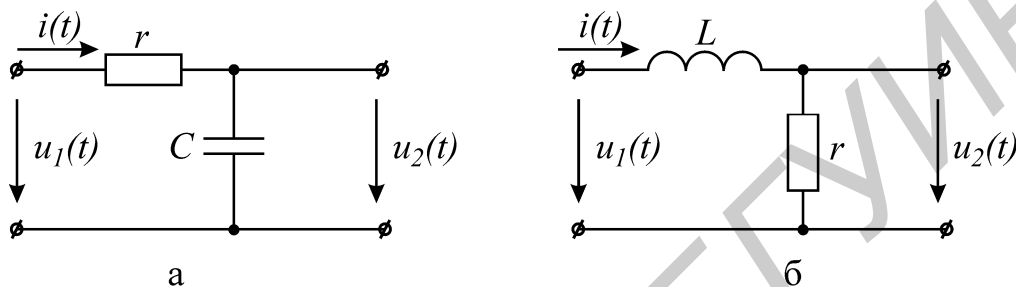


Рис.13.7

Напряжение на выходе

$$u_2 = \frac{1}{C} \int i dt. \quad (13.7)$$

Если напряжение на емкости составляет малую часть от напряжения на сопротивлении, то ток $i(t)$ в цепи будет пропорционален входному напряжению:

$$i(t) \approx \frac{u_1(t)}{r},$$

следовательно,

$$u_2(t) = u_c \approx \frac{1}{rC} \int u_1 dt. \quad (13.8)$$

Итак, при выполнении условия

$$u_c \ll u_r \text{ или } u_1 \approx u_r \quad (13.9)$$

цепь rC является интегрирующей.

Условие (13.9) для гармонического сигнала с частотой ω можно записать

$$\frac{1}{\omega C} \ll r; \quad \frac{1}{\omega} \ll rC = \tau.$$

На практике принимается

$$C \geq \frac{10}{\omega r}. \quad (13.10)$$

При несинусоидальном сигнале условие (13.10) должно выполняться для гармонической составляющей наименьшей частоты ω_H , т.е. частоты повторения входного сигнала.

В качестве примера рассматривается выходное напряжение интегрирующей

rC -цепи при воздействии на вход прямоугольного импульса (рис. 13.8, а).

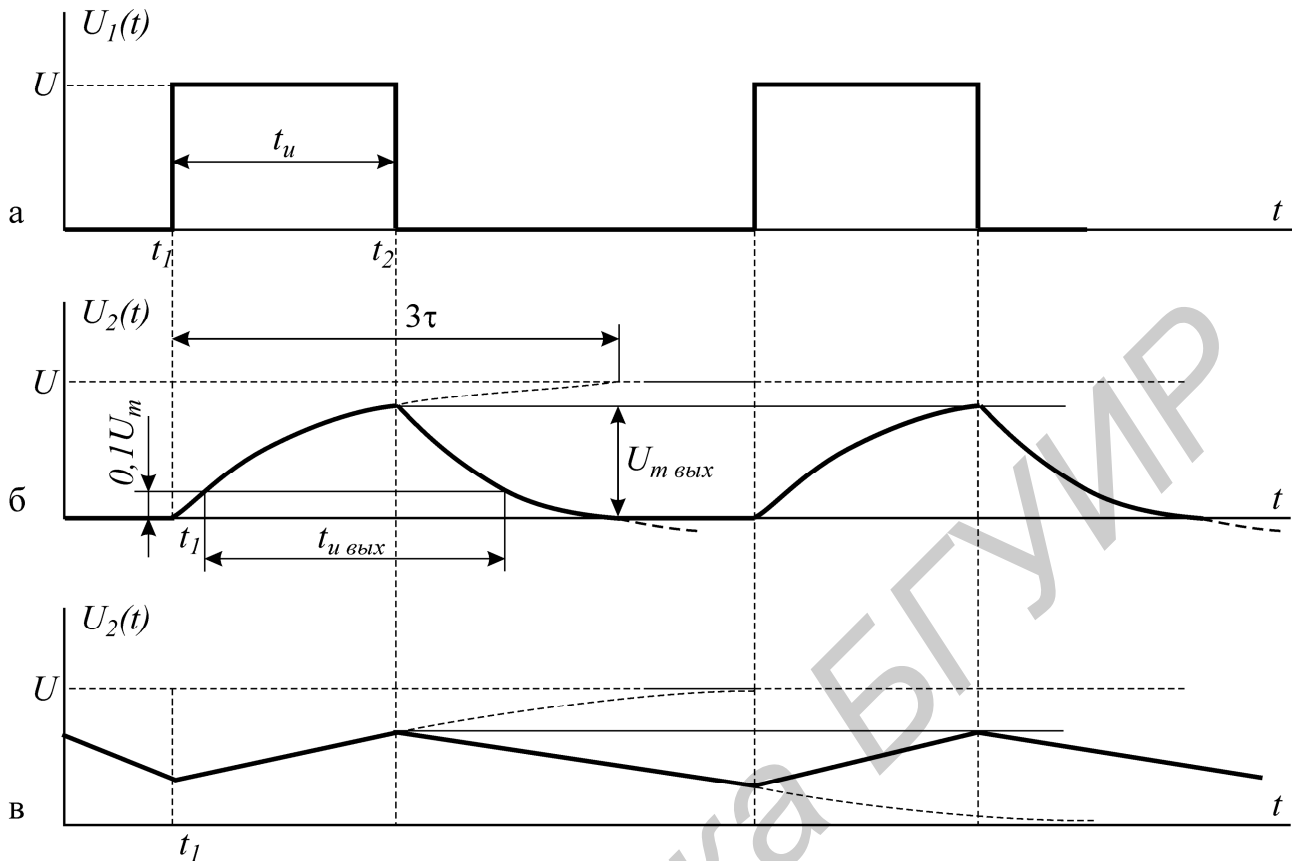


Рис.13.8

Выходное напряжение на емкости в интервале времени от t_1 до t_2 изменяется по закону

$$u_2(t) = U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

Максимальное напряжение на выходе

$$U_{m \text{ вых}} = U \left(1 - e^{-\frac{t_u}{\tau}} \right).$$

При условии, что постоянная времени τ цепи больше длительности входного импульса, выходное напряжение на участке $t_1 - t_2$ меняется почти по линейному закону, т.е. выходное напряжение является интегралом входного напряжения прямоугольной формы.

Следует отметить, что чем больше τ , тем точнее выполняется операция интегрирования (закон линейности), но выходное напряжение по величине значительно меньше входного (рис. 13.8, в).

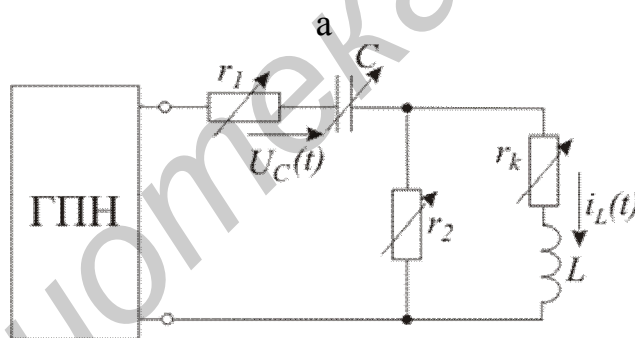
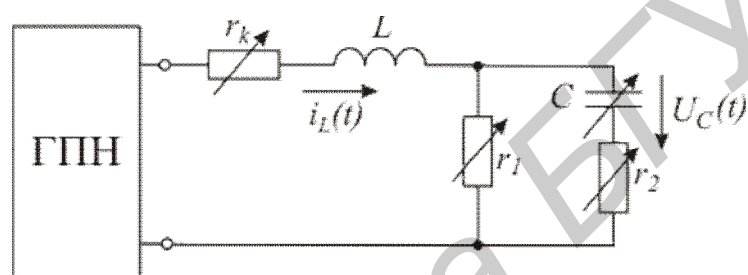
Время $t_{u \text{ вых}}$ измеряется на уровне $0,1 U_{m \text{ вых}}$, как это показано на рис. 13.8, б и в. Эта цепь называется еще удлиняющей, потому что длительность импульса на выходе получается больше длительности входного импульса.

Домашнее задание

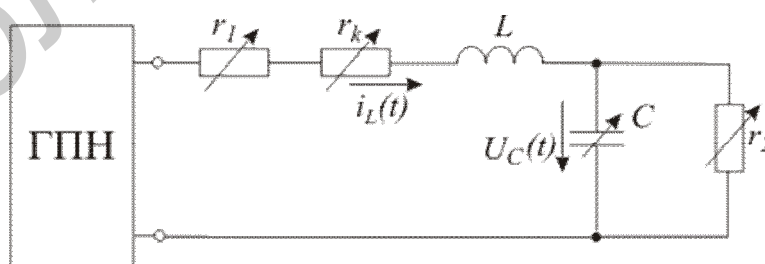
1. Изучить классический метод расчета переходных процессов в сложных электрических цепях.

2. Определить классическим методом ток в заданной цепи и напряжение на емкости при заряде конденсатора (схема на рис. 13.9 в соответствии с вариантом)

В качестве источника ЭДС в исследуемых цепях используется генератор прямоугольного напряжения (ГПН). Действие прямоугольного напряжения с амплитудой 5 В на нагрузку при длительности импульса, превышающей постоянную времени цепи, эквивалентно подключению цепи к источнику с постоянной ЭДС $E = 5$ В.



б



в

Рис.13.9

Параметры схемы и определяемые величины даны в табл. 13.1 в соответствии с номером варианта.

Таблица 13.1

Вариант	Схема	Исходные данные					Определяемые величины			
		r_1 , (Ом)	r_2 , (Ом)	C , (мкФ)	r_H , (Ом)	L , (Гн)				
1	а	100	30	1,0	100	0,14	$i_L(t)$	$u_c(t)$	τ	$T_c = \frac{2\pi}{\omega_c}$
2	б	5000	30	0,25	100	0,14	$i_L(t)$	$u_c(t)$		
3	в	5000	30	0,25	100	0,14	$i_L(t)$	$u_c(t)$		
4	а	100	30	0,25	100	0,14	$i_L(t)$	$u_c(t)$		
5	б	5000	30	0,5	100	0,14	$i_L(t)$	$u_c(t)$		
6	в	5000	30	1,0	100	0,14	$i_L(t)$	$u_c(t)$		

3. Построить графики $i_L(t)$ и $u_c(t)$.

4. Определить декремент и логарифмический декремент колебаний, а также частоту собственных колебаний.

5. Рассчитать сопротивление $r = r_3$ (рис. 13.10,а) и постоянную времени τ дифференцирующей цепи по формуле (13.6) в случае подачи на вход прямоугольного импульса длительностью 0,01с с амплитудой 10 В при частоте повторения $f = 50$ Гц и емкости $C = 0,5$ мкФ. Построить временные диаграммы напряжений на входе и выходе цепи.

6. Рассчитать емкость C (рис. 13.10, б) и постоянную времени по формуле (13.10), при которой RC-цепь является интегрирующей. На вход цепи поступает прямоугольный импульс длительностью 0,01 с с амплитудой 5 В при частоте повторения $f = 50$ Гц и сопротивлении $r_3 = 5800$ Ом. Построить временные диаграммы напряжений на входе и выходе: $U_1(t)$ и $U_2(t)$.

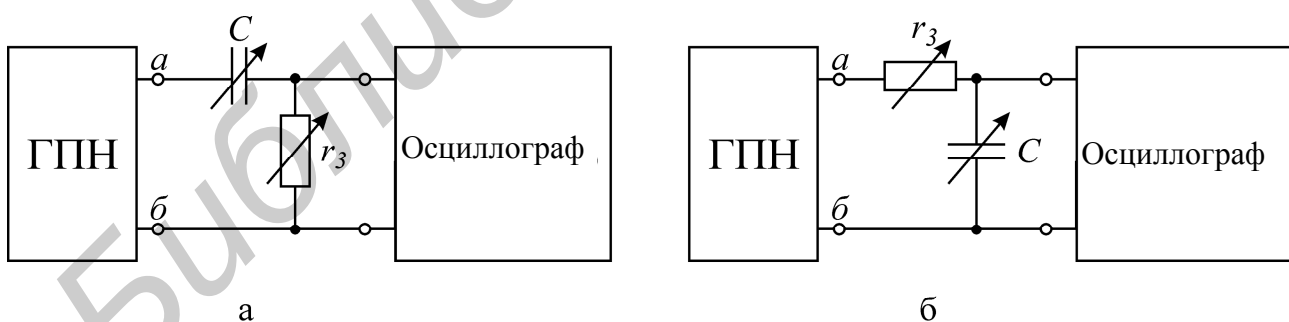


Рис.13.10

Последовательность выполнения лабораторной работы

1. Ознакомиться с рабочей инструкцией к осциллографу.
2. Включить осциллограф и подготовить его к работе.

3. Включить ГПН и зарисовать с экрана осциллографа форму кривой напряжения на клеммах «нагрузка». Определить амплитуду и длительность импульсов с помощью калибратора осциллографа (см. рабочую инструкцию к осциллографу).

4. Собрать схему заданного варианта, подключив ее к клеммам «нагрузка» ГПН. Зарисовать с экрана осциллографа кривые формы тока $i_L(t)$ и напряжения на конденсаторе $U_c(t)$, заданные в домашнем задании (кривая тока снимается с активного сопротивления).

5. Измерить в мм по масштабной сетке осциллографа величину двух соседних амплитуд a_1 и a_2 затухающих колебаний напряжения на конденсаторе $U_c(t)$ (рис. 13.3).

6. Определить длительность периода T_c собственных колебаний $U_c(t)$, увеличив размер изображения с помощью ручек управления осциллографа.

7. Вычислить частоту собственных колебаний по формуле $f_c = \frac{1}{T_c}$ и логарифмический декремент колебаний θ по формуле (13.2) и сравнить с рассчитанными в домашнем задании.

8. Изменяя r и C , выяснить влияние этих параметров на переходный процесс, т.е. на τ , T_c .

9. Собрать дифференцирующую цепь с емкостью $C = 0,5$ мкФ и сопротивлением $r = r_3$, рассчитанным в домашнем задании, подключить к источнику (рис. 13.10, а). Срисовать форму выходного напряжения, определить амплитуду, длительность импульса и постоянную времени.

10. Проанализировать влияние r_3 и C на форму выходного напряжения, для этого при $C = 0,5$ мкФ установить $r'_3 = 10r_3$. Срисовать форму выходного напряжения, определить амплитуду, длительность импульса и постоянную времени τ . Сравнить с формой выходного напряжения, полученного в п.9.

11. Собрать интегрирующую цепь (рис. 13.10, б) с сопротивлением $r = 5800$ Ом и емкостью C , полученными в домашнем задании. Срисовать форму выходного напряжения, определить амплитуду, длительность импульса и постоянную времени τ .

12. Проанализировать влияние параметров интегрирующей цепи на форму выходного напряжения.

Срисовать форму выходного напряжения и сравнить с формой выходного напряжения, полученного в п. 11.

Вопросы к лабораторной работе

1. Законы коммутации.
2. Что понимают под принужденными и свободными составляющими токов и напряжений?
3. Что понимают под начальными условиями? Как они определяются?

4. Какими могут быть корни характеристического уравнения?
5. Определение постоянных интегрирования.
6. Характер свободного процесса при одном корне.
7. Характер свободного процесса при двух вещественных неравных корнях.
8. Характер свободного процесса при двух вещественных равных корнях.
9. Характер свободного процесса при двух комплексных сопряженных корнях.
10. Порядок расчета переходного процесса классическим методом.
11. Определение постоянной времени графически и аналитически.
12. Постоянные времени заряда и разряда конденсатора. Их физический смысл.
13. Зависимость напряжения и тока от времени при заряде и разряде конденсатора.
14. Дифференцирующая цепь, физический смысл процессов, происходящих в дифференцирующей цепи.
15. Определить условие, при котором rC -цепь является дифференцирующей.
16. Форма кривой напряжения на выходе дифференцирующей rC -цепи при подаче на вход прямоугольных импульсов, ее зависимость от длительности входного импульса и постоянной времени цепи.
17. Возможно ли идеальное дифференцирование в цепи rC ?
18. Условие дифференцирования rC -цепи при несинусоидальном входном сигнале.
19. Условие, при котором rL -цепь является дифференцирующей.
20. Форма кривой напряжения на выходе дифференцирующей rL -цепи при подаче на вход прямоугольных импульсов, ее зависимость от длительности входного импульса и постоянной времени цепи.
21. Интегрирующая цепь. Физический смысл процессов, происходящих в интегрирующей цепи.
22. Определить условие, при котором rC -цепь является интегрирующей. Выбор r и C интегрирующей цепи.
23. Применение интегрирующих и дифференцирующих цепей.
24. Почему дифференцирующую цепь называют укорачивающей, а интегрирующую – удлиняющей цепью?

[1, с. 234–250]; [2, с. 427–458]; [3, с. 206–209]; [4, с. 303–337, 313–319];
 [5, с. 134, 168–197]

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Цель работы

Экспериментальное и теоретическое определение параметров пассивного несимметричного четырехполюсника.

Основные теоретические положения

Четырехполюсником называется электрическая цепь или часть цепи, сколь угодно сложной по своему составу и конфигурации, имеющая две пары зажимов. К одной паре зажимов (входной) присоединяется источник энергии, к другой паре (выходной) – потребитель, а могут быть обе пары или входные или выходные (рис. 14.1).

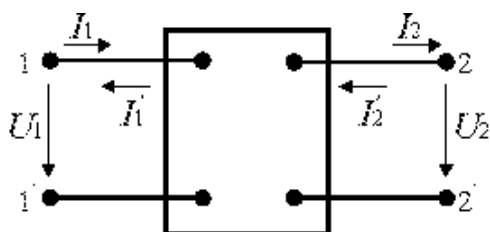


Рис. 14.1

Теория четырехполюсника разработана обстоятельно. Она облегчает расчет цепей благодаря типизации уравнений, привлечению матричного исчисления, использованию таблиц для наиболее часто встречающихся видов четырехполюсников. Четырехполюсники могут быть классифицированы по различным признакам:

линейные, нелинейные, пассивные, активные, симметричные и несимметричные и т.д.

В работе исследуется линейный пассивный четырехполюсник, т.е. такой, который не содержит в себе нелинейных элементов и источников энергии.

Электромагнитное состояние четырехполюсника задается напряжением \dot{U}_1 током \dot{I}_1 на входе, напряжением \dot{U}_2 током \dot{I}_2 на выходе. Эти четыре величины взаимосвязаны и для них могут быть записаны следующие шесть форм уравнений:

1. Форма Y: $\dot{I}_1 = Y_{11} \dot{U}_1 + Y_{12} \dot{U}_2$, $\dot{I}_2 = Y_{21} \dot{U}_1 + Y_{22} \dot{U}_2$, \dot{I}_1 и \dot{I}_2 выражаются в зависимости от \dot{U}_1 и \dot{U}_2 .

2. Форма Z: $\dot{U}_1 = Z_{11} \dot{I}_1 + Z_{12} \dot{I}_2$, $\dot{U}_2 = Z_{21} \dot{I}_1 + Z_{22} \dot{I}_2$, \dot{U}_1 и \dot{U}_2 выражаются в зависимости от \dot{I}_1 и \dot{I}_2 .

3. Форма A: $\dot{U}_1 = A_{11} \dot{U}_2 + A_{12} \dot{I}_2$, $\dot{I}_1 = A_{21} \dot{U}_2 + A_{22} \dot{I}_2$, \dot{U}_1 и \dot{I}_1 выражаются в зависимости от \dot{U}_2 и \dot{I}_2 .

4. Форма B: $\dot{U}_2 = B_{11} \dot{U}_1 + B_{12} \dot{I}_1$, $\dot{I}_2 = B_{21} \dot{U}_1 + B_{22} \dot{I}_1$, \dot{U}_2 и \dot{I}_2 выражаются в зависимости от \dot{U}_1 и \dot{I}_1 .

5. Форма Н: $\dot{U}_1 = H_{11} \dot{I}_1 + H_{12} \dot{U}_2$, $\dot{I}_2 = H_{21} \dot{I}_1 + H_{22} \dot{U}_2$, \dot{U}_1 и \dot{I}_2 выражаются в зависимости от \dot{I}_1 и \dot{U}_2 .

6. Форма F: $\dot{I}_1 = F_{11} \dot{U}_1 + F_{12} \dot{I}_2$, $U_2 = F_{21} \dot{U}_1 + F_{22} \dot{I}_2$, \dot{I}_1 и \dot{U}_2 выражаются в зависимости от \dot{U}_1 и \dot{I}_2 .

На рис. 14.1 обозначены принятые положительные направления для токов и напряжении на выводах четырехполюсника. Вариант с токами \dot{I}_1 и \dot{I}_2 принято называть прямой передачей (уравнения по форме А), вариант с токами \dot{I}'_1 и \dot{I}'_2 - обратной передачей (уравнения по форме В). Используется вариант с токами \dot{I}'_1 и \dot{I}'_2 (уравнения по формам У, Z, Н, F). Каждая система параметров полностью определяет четырехполюсник. Если в данной системе параметров хотя бы один из них равен бесконечности, то эта система параметров для рассматриваемого четырехполюсника не существует.

Размерность параметров видна из уравнений четырехполюсника в соответствующей форме. Применение той или иной формы уравнений определяется поставленной задачей и заданной схемой четырехполюсника. Система уравнений в форме А-параметров

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= A_{11} \dot{U}_2 + A_{12} \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= A_{21} \dot{U}_2 + A_{22} \dot{I}_2 \end{aligned} \quad 14.1$$

комплексные коэффициенты A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} зависят от частоты и схемы соединения элементов четырехполюсника. Коэффициенты A_{11} , A_{22} - безразмерные величины, A_{12} имеет размерность сопротивления, A_{21} проводимости.

Все линейные пассивные четырехполюсники обладают свойством обратимости, т.е.

$$\frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2} = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}$$

Для обратимых четырехполюсников имеет место равенство

$$A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1 \quad 14.2$$

Поэтому для обратимых четырехполюсников только три из четырех параметров A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} являются независимыми; четвертый связан с остальным условием (14.2).

Для симметричных четырехполюсников

$$A_{11} = A_{22} \quad 14.3$$

Параметры четырехполюсника находят различными способами.

1. Метод приравнивания коэффициентов. Составляется система уравнений по законам Кирхгофа, методом контурных токов, или узловых напряжений, которая затем приводится к одной из шести форм записи уравнений четырехполюсника, коэффициенты при токах и напряжениях приравниваются к

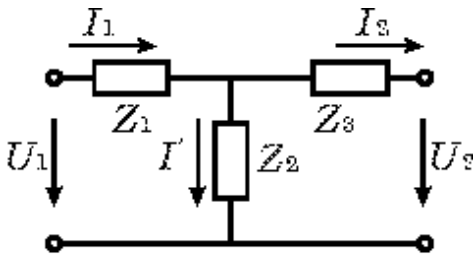


Рис. 14.2

параметрам соответствующих уравнений четырехполюсника.

ПРИМЕР. Определим А-параметры Т-образной схемы несимметричного четырехполюсника (рис.14.2).

По I закону Кирхгофа

$$\dot{I}_1 = \dot{I}' + \dot{I}_2 = \frac{U_2 - \dot{Z}_3 \dot{I}_2}{Z_2} + \dot{I}_2 = \frac{1}{Z_2} U_2 + \left(1 - \frac{Z_2}{Z_3}\right) \dot{I}_2 \quad 14.4$$

По II закону Кирхгофа

$$\dot{U}_1 = Z_1 \dot{I}_1 + Z_3 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 = \left[\frac{1}{Z_1} U_2 + \left(1 + \frac{Z_3}{Z_2}\right) \dot{I}_2 \right] Z_1 + Z_3 \dot{I}_2 + U_2 = \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2}\right) U_2 + \left(Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2}\right) \dot{I}_2 \quad 14.5$$

Сравнивая уравнения (14.4),(14.5) с уравнением (14.1), получим коэффициенты четырехполюсника

$$\begin{aligned} A_{11} &= 1 + Z_1/Z_2; & A_{12} &= Z_1 + Z_3 + Z_1 Z_3/Z_2 \quad [\text{Ом}]; \\ A_{21} &= 1/Z_2 \quad [\text{Ом}]; & A_{22} &= 1 + Z_3/Z_2 \end{aligned} \quad 14.6$$

Проверка коэффициентов: $A_{11}A_{22} - A_{21}A_{12} = (1 + Z_1/Z_2)(1 + Z_3/Z_2) - (Z_1 + Z_3 + Z_1 Z_3/Z_2)1/Z_2 = 1$

Данный метод используется для определения параметров простейших четырехполюсников.

2. Метод холостого хода и короткого замыкания. Этот метод позволяет определять параметры как расчетным путем, так и экспериментально через токи и напряжения режима холостого хода и короткого замыкания или через входные сопротивления режима холостого хода и короткого замыкания.

2.1. Коэффициенты линейного четырехполюсника не зависят от величины токов и напряжений. Следовательно, их можно вычислить при напряжениях, равных нулю (режим к.з. закорочены зажимы), и при токах, равных нулю (режим х.х. зажимы разомкнуты).

Формулы для определения параметров этим способом получаются непосредственно из основных уравнений четырехполюсника (14.1). Если $I_2=0$ (режим х.х. на зажимах 2-2'), уравнения (14.1) примут вид $\dot{U}_{1x} = A_{11} \dot{U}_2$, $\dot{I}_{1x} = A_{12} \dot{U}_2$, откуда

$$A_{11} = \dot{U}_{1x} / \dot{U}_2 \quad (14.7)$$

$$A_{21} = \dot{I}_{1x} / \dot{U}_2 \quad (14.8)$$

В режиме короткого замыкания зажимов 2-2' $\dot{U}_2=0$ и $\dot{U}_{1K}=A_{12}\dot{I}_2$, $\dot{I}_{1K}=A_{22}\dot{I}_2$, тогда

$$A_{12}=\dot{U}_{1K}/\dot{I}_2 \quad (14.9),$$

$$A_{22}=\dot{I}_{1K}/\dot{I}_2 \quad (14.10).$$

В соотношения (14.7), (14.8), (14.9), (14.10) входят комплексные значения \dot{U}_{1K} , \dot{I}_{1K} , \dot{U}_{1X} , \dot{I}_{1X} , \dot{U}_2 , \dot{I}_2 . При расчёте параметров четырехполюсника этим методом должны быть известны и модули, и фазы комплексных величин соответствующих токов и напряжений.

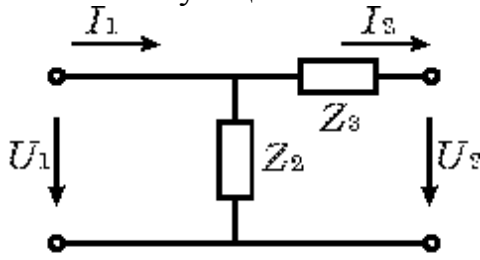


Рис. 14.3

ПРИМЕР. Определим параметры Г-образного четырехполюсника (рис. 14.3) через токи и напряжения режимов х.х. и к.з.

Если $I_2=0$ (режим х.х.),
 $\dot{U}_{1X}=\dot{U}_2$; $A_{11}=\dot{U}_{1X}/\dot{U}_2=1$;
 $\dot{I}_{1X}=\dot{U}_{1X}/Z_2=\dot{U}_2/Z_2$; $A_{21}=\dot{I}_{1X}/\dot{U}_2=1/Z_2$.

Если $\dot{U}_2=0$ (режим к.з.),
 $A_{12}=\dot{U}_{1K}/\dot{I}_2=\dot{U}_{1K}Z_3/\dot{U}_{1K}=Z_3$;
 $\dot{I}_2=\dot{I}_{1K}/Z_3$; $A_{22}=\dot{I}_{1K}/\dot{I}_2=\dot{I}_{1K}(Z_2+Z_3)/\dot{I}_{1K}Z_3=1+Z_2/Z_3$.

2.2. Определение коэффициентов А-параметров через входные сопротивления четырехполюсника в режимах холостого хода и короткого замыкания при питании с первичных и вторичных зажимов.

При питании с первичных зажимов

$$Z_{1K}=\dot{U}_{1K}/\dot{I}_{1K} \quad (14.11)$$

- входное сопротивление четырехполюсника со стороны зажимов 1-1' при замыкании зажимов 2-2',

$$Z_{1X}=\dot{U}_{1X}/\dot{I}_{1X} \quad (14.12)$$

- входное сопротивление четырехполюсника со стороны зажимов 1-1' при разомкнутых зажимах 2-2'.

Если источник питания подключить к зажимам 2-2', то

$$Z_{2K}=\dot{U}_{2K}/\dot{I}_{1K} \quad (14.13)$$

- входное сопротивление четырехполюсника со стороны зажимов 2-2' при замкнутых зажимах 1-1',

$$Z_{2X}=\dot{U}_{2X}/\dot{I}_{2X} \quad (14.14)$$

- входное сопротивление четырехполюсника в режиме х.х. при питании со стороны вторичных зажимов.

По найденным комплексным сопротивлениям (14.11) - (14.14) определяются коэффициенты четырехполюсника:

$$A_{11}=\sqrt{\frac{Z_{1X}}{Z_{2X}-Z_{2K}}} \quad A_{12}=A_{11}Z_{2K}; \quad (14.15)$$

$$A_{21}=A_{11}/Z_{1X}; \quad A_{22}=A_{11}Z_{2X}/Z_{1X}.$$

В различных формах уравнений для дачного четырехполюсника имеют место одни и те же значения \dot{U}_1 , \dot{I}_1 , \dot{U}_2 , \dot{I}_2 и \dot{I}'_1 , \dot{I}'_2 . Это позволяет выразить одни параметры через любые другие. Например, при переходе от системы У -

параметров к системе Z - параметров уравнения (14.16)

$$\dot{I}_1 = Y_{11}\dot{U}_1 + \dot{I}_1 = Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2; \quad \dot{I}'_2 = Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2 \quad (14.16)$$

решаются относительно $\dot{U}_1(I_1, I_2)$ и $\dot{U}_2(I_1, I_2)$:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 Y_{22}/\Delta Y + \dot{I}'_2 (-Y_{12})/\Delta Y; \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_1 (-Y_{21})/\Delta Y + \dot{I}_2 Y_{11}/\Delta Y, \end{aligned}$$

т.е. параметры Z получаются равными

$$Z_{11} = Y_{22}/\Delta Y; \quad Z_{12} = -Y_{12}/\Delta Y; \quad Z_{21} = -Y_{21}/\Delta Y; \quad Z_{22} = Y_{11}/\Delta Y, \quad \text{где } \Delta Y = Y_{11}Y_{22} - Y_{12}Y_{21}.$$

Подобным образом можно найти взаимную связь между любыми параметрами.

Домашнее задание

1. Вычислить коэффициенты $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$ четырехполюсника для заданного варианта (табл. 14.1, рис. 14.4) методом приравнивания коэффициентов и через токи и напряжения режимов х.х. и к.з. Проверить условие: $A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} = 1$

2. Перейти от A-параметров к параметрам систем, указанных в варианте задания, рассчитать их.

3. Построить АЧХ и ФЧХ исследуемого четырехполюсника.

Таблица 14.1

№ Варианта	Схема на рис.14.4	$f, \Gamma\text{ц}$	$r_1, \text{Ом}$	$r_2, \text{Ом}$	$C_1, \text{мкФ}$	$C_2, \text{мкФ}$	От A-параметров перейти к параметрам	По эксперименту найти коэффициенты
1	а	100	7500	1000	0,5	-	У,Н	$Y_{11} \quad Y_{22}$ $H_{11} \quad H_{22}$
2	б	400	4700	-	0,5	-	F,Z	$F_{11} \quad F_{22}$ $Z_{11} \quad Z_{22}$
3	в	300	750	750	0,5	-	Z,У	$Y_{11} \quad Y_{22}$ $Z_{11} \quad Z_{22}$
4	г	300	4700	-	0,5	-	Н,F	$H_{11} \quad H_{22}$ $F_{11} \quad F_{22}$
5	д	300	1000	-	0,5	1	У,F	$Y_{11} \quad Y_{22}$ $F_{11} \quad F_{22}$
6	е	400	1000	-	0,5	0,5	Z,Н	$Z_{11} \quad Z_{22}$ $H_{11} \quad H_{22}$

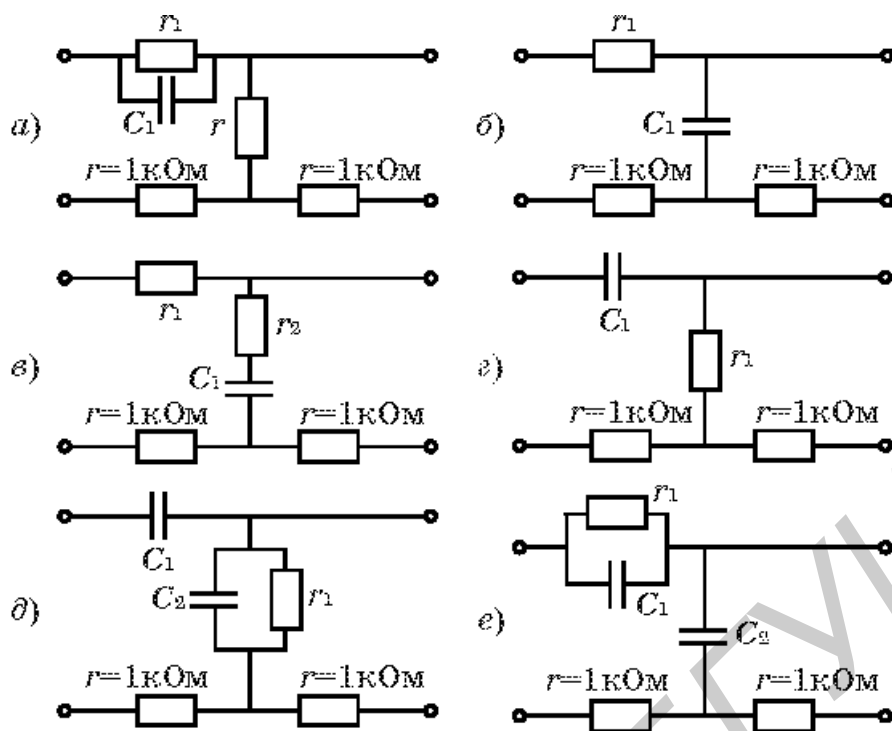


Рис. 14.4

Подготовка лабораторной установки к работе

Питание схемы производится от звукового генератора сигналов ГЗ-33, Измерение напряжений осуществляется вольтметром ВЗ-33. Сопротивления $r=1\text{ к}\Omega$, расположенные на панели макета и включенные на входе и выходе четырехполюсника, предназначены для определения напряжения на них, расчета тока на входных зажимах четырехполюсника и для измерения фазового сдвига между входным напряжением и током. Начальная фаза опорного напряжения \dot{U}_1 или \dot{U}_2 принята равной нулю.

Измерение сдвига по фазе между входными напряжениями U , при питании со стороны первичных зажимов и U_2 при питании со вторичных зажимов и соответственно токами I_1 или I_2 четырехполюсника осуществляется фазометром Ф2.

Внимание!

1. Чтобы не повредить стрелку фазометра, при отсутствии сигнала, переключатель рода работы поставить в положение "Калибр" или "Уст.0".

2. Если стрелка зашкаливает влево, то переключите тумблер в положение "Опережает" - "отстает",

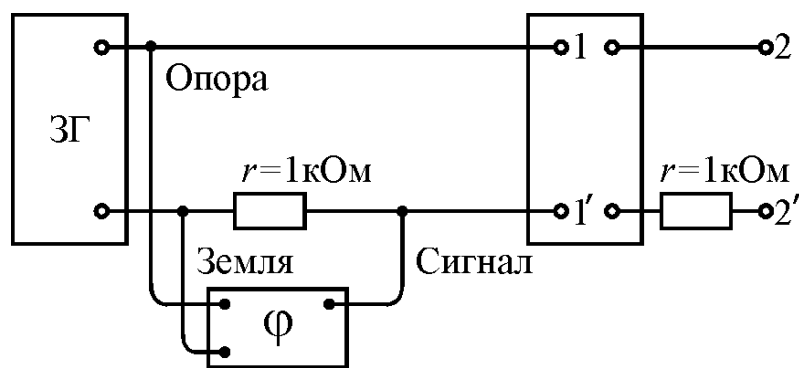


Рис. 14.5

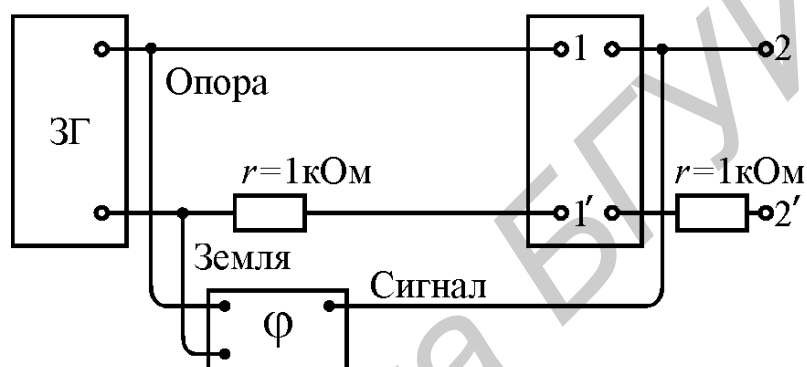


Рис. 14.6

Последовательность выполнения работы

1. Собрать цепь по схеме (рис. 14.5), На генераторе установить заданную частоту. На вход подать напряжение 8-10 В, провести опыты холостого хода и короткого замыкания при питании четырехполюсника со стороны входных зажимов и со стороны выходных зажимов. В каждом опыте измерить напряжение на входе, на сопротивлении R и угол сдвига фазы между ними. Данные занести в табл. 14.2.

Таблица 14.2

U_{1X}	U_{RX}	I_{1X}	φ_{1X}	Z_{1X}	U_{1K}	U_{RK}	I_{1K}	φ_{1K}	Z_{1K}
U_{2X}	U_{RX}	I_{2X}	φ_{2X}	Z_{2X}	U_{2K}	U_{RK}	I_{2K}	φ_{2K}	Z_{2K}

2. По сопротивлениям режима холостого хода и короткого замыкания рассчитать A-параметры, сравнить их с данными расчета домашнего задания.

3. На основе данных табл.14.2 определить параметры систем уравнений согласно заданию (табл. 14.1).

4. Экспериментально по току и напряжению режима х.х. определить коэффициенты A_{11} , A_{21} . Опыт провести по схеме рис.14.6.

5. Снять и построить амплитудно-частотную и фазочастотную зависимости

$$A_{11} = ae^{j\alpha} = \left(\frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \right)_{I_2=0}$$

(коэффициент отношения напряжения при разомкнутых

выходных зажимах). Напряжение на входе поддерживать постоянным 7-10 В, частоту изменять в пределах от 50 до 400 Гц. Результаты эксперимента (6-7 точек) занести в табл. 14.3.

Таблица 14.3

f	
U_1	
U_2	
α	
$A=ae^{j\alpha}$	

6. Построить качественно векторную диаграмму напряжений и токов исследуемой цепи.

Вопросы к лабораторной работе

1. Является ли исследуемый четырехполюсник обратимым, симметричным? Почему?

2. Какие методы применяются для теоретического и экспериментального определения A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} ?

3. Какова связь между параметрами различных форм уравнений?

4. Что относится к входным функциям четырехполюсника?

[1, с.233-254]; [9, с.9-26]; [10, с.505-524]

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ЗВЕЗДОЙ

Цель работы

Изучение основных свойств симметричной и несимметричной трехфазных систем при соединении звездой. Опытное определение соотношений между линейными и фазными напряжениями и токами при различных нагрузках отдельных фаз. Выяснение роли нейтрального провода. Измерение мощности в трехфазной цепи методом двух ваттметров. Построение векторных диаграмм по экспериментальным данным.

Основные теоретические положения

Трехфазную систему называют симметричной, если все ЭДС, напряжения и токи, входящие в нее, имеют одинаковую по модулю величину и сдвинуты по фазе на один и тот же угол, равный 120° .

Трехфазный приемник состоит из трех пассивных двухполюсников. Если все двухполюсники обладают одинаковым сопротивлением, трехфазный приемник является симметричным.

Источники энергии и нагрузка трехфазной системы могут быть соединены звездой или треугольником. При соединении по схеме звезды концы всех обмоток генератора соединяются в один узел, так же соединяются концы всех сопротивлений приемника. Полученные точки называются нулевыми или нейтральными точками генератора и приемника. Оставшиеся концы соответствующих фаз генератора и нагрузки соединяются линейными проводниками (рис. 16.1). Такая трехфазная система называется трехпроводной. Если нейтральная точка генератора N и нейтральная точка приемника n соединены между собой – система четырехпроводная.

В трехфазных системах различают линейные и фазные токи и напряжения. Линейные – это напряжения между проводами линии, связывающей нагрузку с генератором, и токи в этих проводах. Фазные величины – это напряжения и токи обмоток генератора или сопротивлений нагрузки. Соотношения между линейными и фазными напряжениями устанавливаются на основе второго закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AB} &= \dot{U}_A - \dot{U}_B, \\ \dot{U}_{BC} &= \dot{U}_B - \dot{U}_C, \\ \dot{U}_{CA} &= \dot{U}_C - \dot{U}_A.\end{aligned}\quad (16.1)$$

На рис. 16.2 в соответствии с вышеприведенными равенствами построена на комплексной плоскости векторная диаграмма линейных напряжений и фазных напряжений генератора. Фазные напряжения:

$$\begin{aligned}\dot{U}_A &= U_\phi; \\ \dot{U}_B &= U_\phi e^{-j120^\circ}; \\ \dot{U}_C &= U_\phi e^{+j120^\circ}.\end{aligned}$$

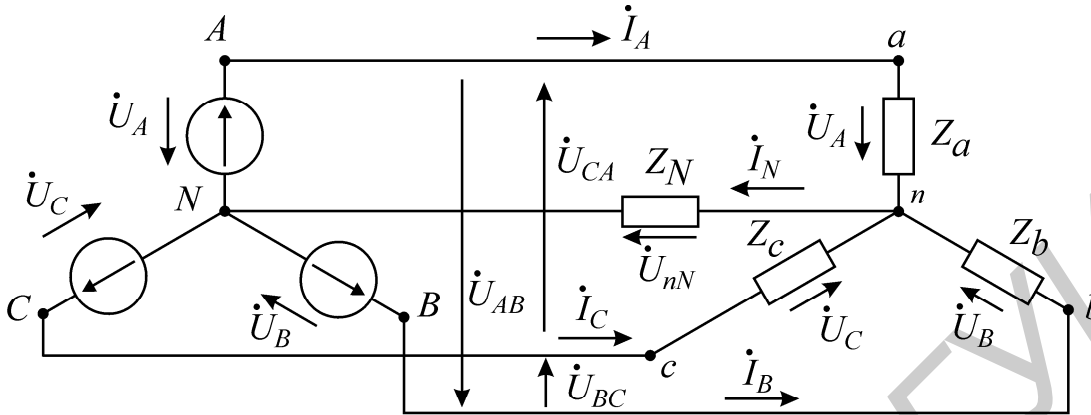


Рис.16.1

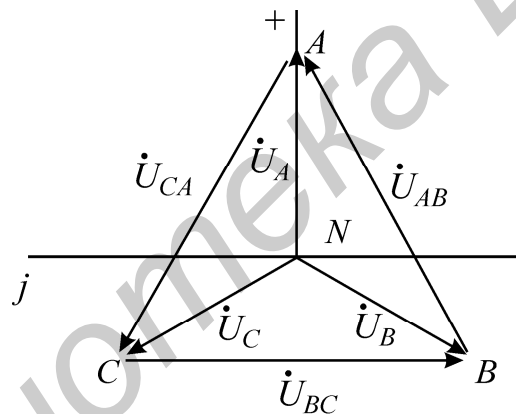


Рис.16.2

Линейные напряжения:

$$\dot{U}_{AB} = U_L e^{j30^\circ}; \quad \dot{U}_{BC} = U_L e^{-j90^\circ}; \quad \dot{U}_{CA} = U_L e^{j150^\circ}.$$

Для симметричной системы соотношения между фазными и линейными напряжениями определяются зависимостью $U_L = \sqrt{3}U_\phi$, а токами – $I_L = I_\phi$.

Трехфазная четырехпроводная цепь

В общем случае, когда система несимметрична, трехфазную цепь при соединении «звезда – звезда» можно рассматривать как разветвленную цепь с двумя узлами. При ее расчете удобно воспользоваться методом узловых напряжений. При этом напряжение между нейтральной точкой нагрузки и нейтральной точкой источника определяется из выражения

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A Y_a + \dot{U}_B Y_b + \dot{U}_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c + Y_N} \quad (16.2)$$

где Y_a , Y_b и Y_c – комплексные проводимости ветвей; Y_N – комплексная проводимость нейтрального провода.

Напряжения фаз нагрузки находятся из уравнений

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN}; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN}; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN}. \quad (16.3)$$

Зная фазные напряжения нагрузки, легко определить токи в фазах

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{Z_c}.$$

Ток в нейтральном проводе $\dot{I}_N = \frac{\dot{U}_{nN}}{Z_N}$. Найденные токи связаны первым

законом Кирхгофа

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_N.$$

Если сопротивление нейтрального провода Z_N в четырех проводной системе равно нулю, то $Y_N = \infty$, и в соответствии с (16.2), напряжение смещения нейтрали \dot{U}_{nN} обращается в нуль. Фазные напряжения приемника при этом равны фазным напряжениям генератора независимо от значений сопротивлений в отдельных фазах нагрузки:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A; \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B; \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C.$$

Это свойство четырехпроводной сети позволяет применять ее для питания неравномерных нагрузок.

Трехфазная трехпроводная цепь

В трехпроводных сетях нейтральный провод отсутствует, поэтому $Y_N = 0$ и формула (16.2) принимает вид

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_A Y_a + \dot{U}_B Y_b + \dot{U}_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c}, \quad (16.4)$$

При симметричном режиме ($Z_a = Z_b = Z_c$) напряжение \dot{U}_{nN} равно нулю, однако изменение любого из сопротивлений приемника приводит к смещению нейтральной точки приемника n относительно нейтральной точки генератора N и, как следствие, к появлению напряжения \dot{U}_{nN} и нарушению симметрии фазных напряжений приемника. Физически смещение нейтрали объясняется тем, что при отсутствии нейтрального провода сумма фазных токов приемника должна давать нуль:

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0, \quad (16.5)$$

т.е. фазные токи не могут принимать произвольные независимые друг от друга значения. Нейтральная точка смещается таким образом, чтобы напряжения на сопротивлениях приемника создавали токи, удовлетворяющие соотношению

(16.5). Чем больше отличаются сопротивления фаз нагрузки друг от друга, тем больше напряжение смещения. Крайними режимами являются обрыв фазы (что соответствует бесконечно большому сопротивлению приемника в этой фазе) и короткое замыкание (сопротивление фазы равно нулю). Рассмотрим эти режимы более подробно на примере фазы А.

1. Обрыв фазы А (рис. 16.3). Проводимость $Y_a = 0$, а проводимости двух других фаз равны $Y_b = Y_c = Y$ и представлены активными сопротивлениями. Из выражения (16.4) следует

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_b Y_b + \dot{U}_c Y_c}{Y_b + Y_c} = \frac{\dot{U}_b + \dot{U}_c}{2} \quad (16.6)$$

Фазные напряжения симметричного источника удовлетворяют равенству $\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 0$, поэтому $\dot{U}_B + \dot{U}_C = -\dot{U}_A$. Подставляя значения суммы в (16.6), получим

$$\dot{U}_{nN} = -\frac{\dot{U}_A}{2}.$$

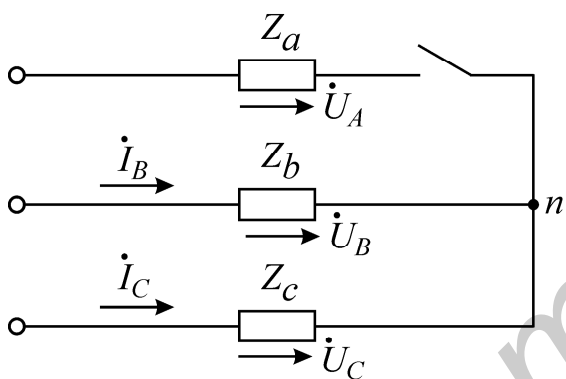


Рис.16.3

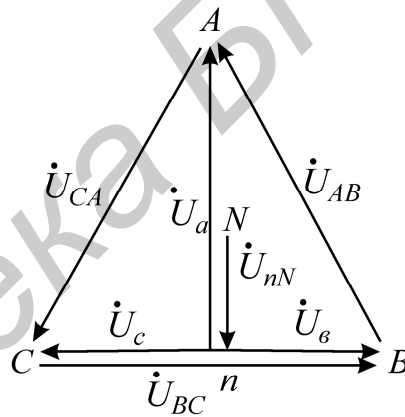


Рис.16.4

Нейтральная точка приемника n смещается на середину вектора линейного напряжения (рис. 16.4).

Напряжение на оборванной фазе

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A - \dot{U}_{nN} = \dot{U}_A + \frac{\dot{U}_A}{2} = \frac{3}{2}\dot{U}_A,$$

т.е. увеличивается до полуторного значения фазного напряжения источника, а на двух других фазах, как видно из векторной диаграммы, составляет половину линейного напряжения:

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN} = \frac{\dot{U}_{BC}}{2};$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN} = -\frac{\dot{U}_{BC}}{2}.$$

По существу, при обрыве приемника Z_a сопротивления Z_b и Z_c образуют последовательную цепь с приложенным линейным напряжением \dot{U}_{BC} и токами

$$\dot{I}_b = -\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_{BC}}{2Z_b}.$$

2. Короткое замыкание фазы А. Сопротивление фазы А равно нулю $Z_a = 0$, ее проводимость обращается в бесконечность $Y_a = \infty$. Нагрузка в фазах В и С представлена активными сопротивлениями и $R_b = R_c$. В соответствии с формулой (16.4) напряжение смещения нейтрали $\dot{U}_{nN} = \dot{U}_A$. Нейтральная точка приемника перемещается вверх на величину фазного напряжения источника питания \dot{U}_A и совпадает с вершиной А треугольника линейных напряжений. Напряжение на закороченной фазе приемника равно нулю $\dot{U}_A = 0$, а фазные напряжения двух других фаз приемника возрастают в $\sqrt{3}$ раз и становятся равными линейным напряжениям

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B - \dot{U}_{nN} = \dot{U}_{BA};$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C - \dot{U}_{nN} = \dot{U}_{CA}.$$

Векторная диаграмма напряжений для режима короткого замыкания изображена на рис. 16.5.

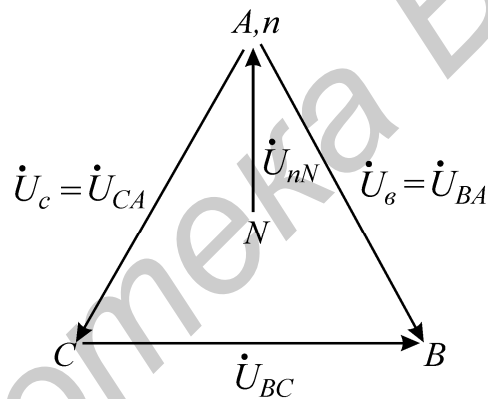


Рис.16.5

При симметричной активной нагрузке достаточно измерить мощность в одной из фаз и затем ее утроить. В несимметричной трехпроводной системе для измерения активной мощности используют два ваттметра. На схеме рис. 16.6 показано включение приборов по методу двух ваттметров. Показание каждого ваттметра определяется величиной подведенного к нему тока и напряжения и косинусом угла сдвига между ними:

$$P_1 = U_{AB} I_A \cos(\angle U_{AB} \hat{I}_A),$$

$$P_2 = U_{CB} I_C \cos(\angle U_{CB} \hat{I}_C).$$

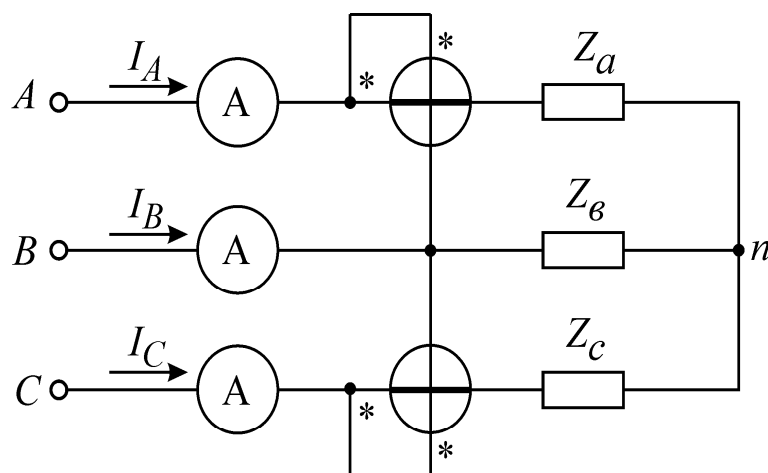


Рис.16.6

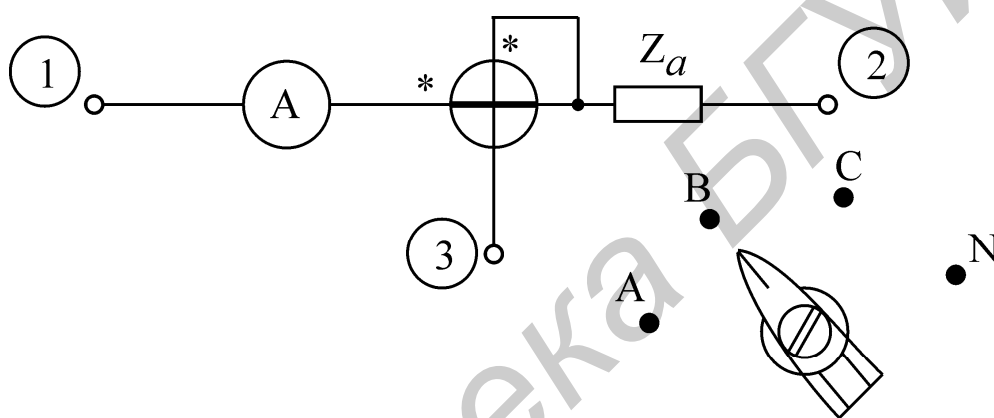


Рис.16.7

Полная мощность трехфазного приемника равна сумме показаний ваттметров ($P = P_1 + P_2$).

В лабораторной работе в качестве источника напряжения используется промышленная сеть с понижающим трансформатором 220/33 В. На щитке питания (щиток на каждом лабораторном столе) фазы обозначены буквами А, В, С.

К каждому варианту работы прилагается комплект измерительных приборов, состоящий из вольтметра, амперметра и ваттметра. Амперметр и ваттметр необходимо включить по схеме, изображенной на рис. 16.7. Клеммы 1, 2, 3 смонтированы на панели макета лабораторной работы. Чтобы измерить мощность и ток в фазе А или фазе С, необходимо переключатель, установленный на передней панели макета, включить в положение «А» или «С». В фазе В измеряется только ток (мощность в фазе В не измеряется, поскольку используется схема двух ваттметров). При исследовании четырехпроводной линии необходимо измерить фазные токи и ток в нейтральном проводе, для этого переключатель поочередно устанавливается в положения «А», «В», «С», «N». Показания снимаются либо со шкалы амперметра, либо, если ваттметр является комбинированным прибором, со

шкалы ваттметра, включенного в режим измерения тока.

Примечание. Элементы – это активные сопротивления, включаемые параллельно. Одно сопротивление (элемент) 280 Ом. Предел измерения токовой обмотки ваттметра необходимо установить с учетом допустимой погрешности. Величина погрешности определяется значением сопротивления токовой обмотки. Значения сопротивлений обмоток ваттметра указаны в паспорте, а также в таблицах, изображенных на крышке прибора.

Домашнее задание

1. Изучить раздел курса «Электротехника» «Трехфазные цепи».

2. Выполнить расчет цепи (рис. 16.6) по данным варианта (табл. 16.1) для трехпроводной цепи. Определить напряжение между нулевыми точками, напряжения каждой фазы нагрузки, токи в каждой фазе и активную мощность, потребляемую цепью.

По данным расчета построить векторную диаграмму.

3. Выполнить расчет токов и напряжений четырехпроводной цепи по данным варианта табл. 16.1, при этом $Z_N = 0$.

По данным расчета построить векторную диаграмму.

Таблица 16.1

Вариант	Линейное напряжение	Количество элементов в фазах			Регулируемая фаза
		фаза А	фаза В	фаза С	
1	33	2	4	4	А
2	33	4	2	4	В
3	33	4	4	2	С
4	33	7	4	4	А
5	33	4	7	4	В
6	33	4	4	7	С

Последовательность выполнения работы

1. Собрать измерительные приборы по схеме рис. 16.8, а трехфазную нагрузку соединить в звезду без нулевого провода.

2. Установить в фазах приемника нагрузки в соответствии с данными табл. 16.1. С помощью вольтметра измерить фазные и линейные напряжения, а также напряжения смещения нейтрали. Включая токовую цепь амперметра и ваттметра в разрыв фазы А, затем фазы В и фазы С, измерить фазные токи и мощности P_1 и P_2 . Экспериментальные данные занести в табл. 16.2 и сравнить с результатами домашнего расчета.

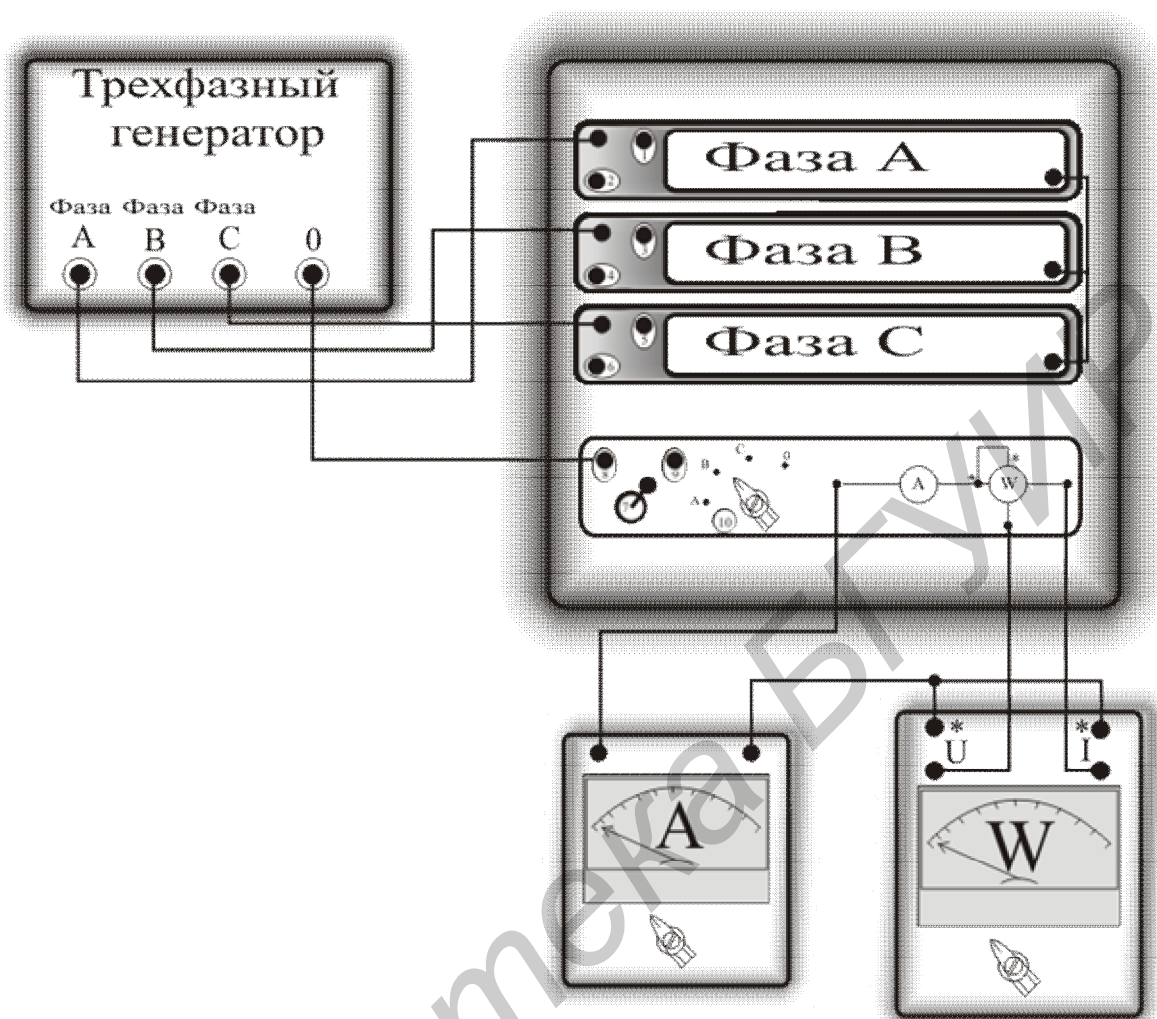


Рис. 16.8

Рекомендации к выполнению лабораторной работы №16 М

Для исследования трехпроводной системы убедитесь, что тумблер 7 находится в положении «трехпроводная»

- 1) для исследования симметричного режима включите по 4 элемента в каждой фазе приемника;
- 2) после исследования симметричного режима количество элементов в каждой фазе включите согласно варианту;
- 3) для исследования режима «Обрыв фазы» выключите все элементы в регулируемой фазе;
- 4) для исследования режима «Сопротивление фазы увеличено» количество элементов в фазах приемника для 1-3 вариантов должно соответствовать табличным данным, а для вариантов 4-6 в регулируемой фазе необходимо включить 1 элемент;

- 5) для исследования режима «Сопrotивление фазы уменьшено» количество элементов в фазах приемника для 4-6 вариантов должно соответствовать табличным данным, а для вариантов 1-3 в регулируемой фазе необходимо включить 7 элементов;
- 6) для исследования режима «Короткое замыкание» необходимо **ВЫКЛЮЧИТЬ ГЕНЕРАТОР ТРЕХФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ**, затем:
- 1 и 4 вариантам следует замкнуть регулируемую фазу, т.е. соединить проводником зажимы 1 и 2,
 - 2 и 5 вариантам следует замкнуть регулируемую фазу, т.е. соединить проводником зажимы 3 и 4,
 - 3 и 6 вариантам следует замкнуть регулируемую фазу, т.е. соединить проводником зажимы 5 и 6;
- 7) напряжение смещения нейтрали U_n измеряется между зажимами 8 и 9
- 8) тумблер 10 предназначен для измерения токов и мощностей
- в положении А : Амперметр покажет ток в фазе А приемника, а ваттметр мощность P
 - в положении В : Амперметр покажет ток в фазе В приемника, а показания ваттметра равно 0
 - в положении С : Амперметр покажет ток в фазе С приемника, а ваттметр мощность P
 - в положении О : Амперметр покажет ток в нейтральном проводе (для четырехпроводной системы);
- 9) тумблер 7 предназначен для перехода от трехпроводной к четырехпроводной системе.

Таблица 16.2

№ пп	Режим работы	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_a	U_b	U_c	I_A	I_B	I_C	U_{nN}	P_1	P_2	P
1	Симметричный режим													
2	Обрыв фазы													
3	Короткое замыкание фазы													
4	Сопrotивление фазы увеличено													
5	Сопrotивление фазы уменьшено													
7	Из домашнего задания													

Таблица 16.3

№ пп	Режим работы	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_a	U_b	U_c	I_A	I_B	I_C	I_N
1	Симметричный режим										
2	Обрыв фазы										
3	Сопротивление фазы увеличено										
4	Сопротивление фазы уменьшено										
5	Из домашнего задания										

3. Изменяя количество нагрузочных элементов в регулируемой фазе, повторить измерения по п. 2 для следующих режимов:

- а) симметричный режим – во всех фазах по 4 элемента;
- б) обрыв фазы;
- в) короткое замыкание фазы;
- г) сопротивление фазы увеличено – включены 2 резистивных элемента;
- д) сопротивление фазы уменьшено – включены 7 резистивных элементов.

4. Подключить к источнику питания приемник, состоящий из двух активных сопротивлений и конденсатора. Соединение выполнить так, чтобы емкостная нагрузка оказалась в регулируемой фазе. Измерить линейные и фазные напряжения и напряжение смещения нейтрали. Емкость конденсатора 20 – 40 мкФ.

5. По данным пп. 2 – 4 построить векторные диаграммы токов и напряжений и сделать вывод о влиянии неравномерности нагрузки на работу трехфазного потребителя, соединенного в звезду без нулевого провода.

6. Соединить нейтральную точку приемника и нейтральную точку источника питания и повторить все предыдущие опыты для четырехпроводной цепи, исключая режим короткого замыкания. Короткое замыкание при наличии нулевого провода является аварийным режимом! Данные опытов занести в табл. 16.3.

7. По экспериментальным данным п. 6 построить векторные диаграммы токов и напряжений и сделать вывод о влиянии неравномерности нагрузки на работу трехфазного потребителя при соединении приемника в звезду с нейтральным проводом.

Вопросы к лабораторной работе

1. Какова зависимость между линейными и фазными напряжениями и токами в симметричной трехфазной цепи, соединенной звездой?
2. Записать линейные и фазные напряжения трех фаз симметричной системы (мгновенные значения, комплексы действующих значений).

3. Как определить напряжение между нейтральными точками приемника и генератора?

4. Как определить токи в фазах и нейтральном проводе трехфазной симметричной системы?

5. Как определить токи в фазах и нейтральном проводе трехфазной несимметричной системы при симметричном источнике?

6. Чему равна сумма линейных напряжений трехфазной системы?

7. Для чего применяется нейтральный провод?

8. Как измеряется активная мощность в симметричной трехфазной системе?

9. Как изменится мощность, если симметричную трехфазную нагрузку переключить со звезды в треугольник?

10. Как изменится мощность, если симметричную трехфазную нагрузку переключить из треугольника в звезду?

11. Как измерить реактивную мощность симметричной трехфазной системы?

[1, с. 169–188]; [2, с. 361–376]; [3, с. 191–200]; [4, с. 264–280], [6, с. 300–312, 317–319]

Литература

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатом, 1989.

2. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники. – М.: Энергия, 1978.

3. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. – М.: Энергия, 1970.

4. Нейман Л. Р., Демирчян Н. С. Теоретические основы электротехники. – М.: Энергия, 1976.

5. Афанасьев Б. П., Гольдин О. Е., Кляцкий И. Теория линейных электрических цепей. – М.: Высш. шк., 1973.

6. Зернов Н. В., Карпов В. Г. Теория радиотехнических цепей. – М.: Энергия, 1972.

7. Алтунина З.Е. Расчет цепей переменного тока графоаналитическим методом. – Мн.: МРТИ, 1979.

Содержание

Лабораторная работа №13 М. Переходные процессы в линейных цепях с сосредоточенными параметрами.....	3
Лабораторная работа №14 М. Исследование пассивного четырехполюсника	15
Лабораторная работа №16 М. Исследование трехфазной системы при соединении звездой.....	23
Литература.....	33

Библиотека БГУИР

Учебное издание

**Батюков Сергей Валентинович,
Шилин Леонид Юрьевич**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

для студентов специальностей «Автоматизированные системы обработки информации», «Вычислительные машины, системы и сети», «Искусственный интеллект»
всех форм обучения

В 2-х частях

Часть 2

Ответственный за выпуск С.В. Батюков

Подписано в печать 06.07.2006.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 2,0.

Формат 60x84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 300 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 2,21.
Заказ 337.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6