

Министерство образования Российской Федерации
Ульяновский государственный технический университет

**СХЕМНО-СИМВОЛЬНЫЙ
И
МАТРИЧНО-ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ
УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ
ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Методические указания для студентов к расчетно-графическим работам по основам теории цепей (специальность 2007 «Радиотехника»), электротехнике и электронике (специальности 2201 «Вычислительные машины, системы и комплексы», 0719 «Информационные системы и технологии»)

Составители:

**С. А. Курганов
В. В. Филаретов
Д. В. Шеин**

Ульяновск 2002

УДК 621.372.061 (076)

ББК 31.211я7

С92

Рецензент: д-р техн. наук, профессор кафедры «Информационные вычислительные комплексы» УлГТУ Л.И.Волгин

Одобрено секцией методических пособий научно-методического совета университета

Схемно-символьный и матрично-численный анализ установившихся режимов линейных электрических цепей: Методические указания / Сост.: С.А.Курганов, В.В.Филаретов, Д.В.Шеин.– Ульяновск: УлГТУ, 2002.– 56 с.

Приводятся задания и методические указания к двум расчетно-графическим работам (РГР). Первое задание посвящено анализу электрических цепей при постоянном воздействии. Второе – расчету цепей при гармоническом режиме. Содержание заданий соответствует государственным образовательным стандартам. При выполнении РГР наряду с традиционными матрично-численными методами рекомендуется использовать схемно-символьный метод, позволяющий получить решение в явной символьной форме. Символьные выражения удобны при исследовании общих свойств характеристик цепей таких как наличие и условия возникновения экстремумов, нулей и полюсов.

Методические указания могут быть полезны студентам других направлений и специальностей, изучающих теоретическую и общую электротехнику.

Материал подготовлен на кафедре «Электроснабжение».

УДК 621.372.061 (076)

ББК 31.211я7

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОСНОВЫ МЕТОДА СХЕМНЫХ ОПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ	5
2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПРИ ПОСТОЯННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ.....	10
2.1. Задание по расчету цепи при постоянном воздействии.....	10
2.2. Указания по выполнению задания.....	14
2.2.1. Пример матрично-численного анализа цепи при постоянном воздействии в системе MathCAD.....	15
2.2.2. Схемно-символьный анализ цепи при постоянном воздействии.....	17
3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ... ..	21
3.1. Задание по анализу цепи при гармоническом воздействии.....	21
3.2. Указания по выполнению задания.....	25
3.2.1. Пример матрично-численного анализа цепи при гармоническом воздействии в системе MathCAD	26
3.2.2. Схемно-символьный анализ цепи при гармоническом воздействии.....	29
4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА ПО РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ.....	33
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	34
ПРИЛОЖЕНИЕ	
Метод схемных определителей в таблицах и рисунках.....	35
Библиографический список.....	56

СПИСОК УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ИНУН	источник напряжения, управляемый напряжением
ИНУТ	источник напряжения, управляемый током
ИТУН	источник тока, управляемый напряжением
ИТУТ	источник тока, управляемый током
МКТ	метод контурных токов
МСО	метод схемных определителей
МУН	метод узловых напряжений
НУИ	неудаляемый управляемый источник
РГР	расчетно-графическая работа
САВ	схемно-алгебраическое выражение
САП	схемно-алгебраическое преобразование
САФ	схемно-алгебраическая формула
ССФ	символьная схемная (системная) функция
УИ	управляемый источник
ЭДС	электродвижущая сила

ВВЕДЕНИЕ

Анализ электрических цепей - наиболее востребованный в специальных дисциплинах раздел теории цепей. В связи с этим освоение методов анализа цепей является очень важным. В методических указаниях рассматривается анализ установившихся режимов линейных электрических цепей при постоянном и гармоническом воздействиях. Для расчета таких режимов используются два подхода: матрично-численный и схемно-символьный.

Матрично-численный подход [1,2,3] получил в последние десятилетия прошлого века наибольшее распространение. Это связано, во-первых, с простотой формирования численных систем уравнений цепей по методам узловых напряжений и контурных токов (МУН и МКТ), во-вторых, с наличием эффективных численных алгоритмов и компьютерных программ решения линейных алгебраических систем уравнений.

Однако матрично-численные методы обладают существенными недостатками. Они требуют многократного формирования и решения систем уравнений при изменении параметров элементов цепи, а также имеют ограниченные возможности при исследовании функций цепей. В связи с этим в методических указаниях наряду с матрично-численным подходом рассматривается схемно-символьный подход, который свободен от указанных выше недостатков.

Символьный анализ [1,4,5] предполагает формирование решения в виде формулы, в которой параметры всех или некоторых элементов представлены символами. Такой подход эффективен для многократного расчета одной и той же цепи при различных значениях параметров, поскольку не требует каждый раз формирования и решения численной системы уравнений. Кроме этого, символьный подход является незаменимым при исследовании общих свойств характеристик цепей: отыскании экстремумов, нулей, полюсов, а также при поиске условий их возникновения.

Для освоения символьного анализа рекомендуется метод схемных определителей (МСО), основанный на выделении параметров элементов схемы [4,5]. Достоинством этого метода является отсутствие необходимости применения матричного, множественного или графового математических аппаратов, что обеспечивает простоту его освоения. При анализе схем используются так называемые схемно-алгебраические выражения (САВ), в которых, наряду с буквенными обозначениями параметров схемы и знаками алгебраических операций, используются изображения производных схем, отождествляемые с их определителями. Искомая символьная схемная функция (ССФ) в этом случае находится в виде отношения САВ числителя и знаменателя. Последовательное преобразование САВ приводит к получению ССФ в обычном алгебраическом виде. Применение схемно-алгебраических формул и выражений на первый взгляд кажется непривычным, однако позволяет сделать процесс решения более наглядным, а также обеспечивает сокращение объема выкладок, поскольку определители производных схем с 2-3

узлами легко запоминаются. Принимая во внимание, что литературы по методу схемных определителей недостаточно, в разделе 1 настоящих методических указаний рассматриваются его теоретические основы, а в приложении дана графическая интерпретация этого метода в виде сводки таблиц с наглядными схемно-алгебраическими формулами, которая может служить “шпаргалкой”, облегчающей усвоение и использование этого метода.

Во втором и третьем разделах изложены задания и методические указания к двум РГР. Первая работа посвящена расчету цепей при постоянном воздействии, вторая – анализу цепей при гармонических источниках.

Задание студент получает в соответствии с групповым и индивидуальным вариантами. Номер группового варианта (их всего 5 в каждом задании) задается преподавателем, индивидуальный вариант выбирается в соответствии с порядковым номером студента в учебном журнале.

1. ОСНОВЫ МЕТОДА СХЕМНЫХ ОПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ

Рассмотрим этот метод на примере резистивных цепей при постоянном воздействии. Все изложенное здесь справедливо и для цепей при гармоническом воздействии в случае использования соответствующих комплексных или операторных схем замещения.

Напряжение U и ток I любой ветви (или стороны и полюса многополюсника соответственно) линейной электрической цепи при постоянных источниках ЭДС E и тока J , показанной на рис. 1.1, могут быть найдены методом наложения:

$$U = K_{EU}E + R_{JU}J, \quad I = G_{EI}E + \beta_{JI}J, \quad (1.1)$$

где K_{EU} – коэффициент передачи напряжения от источника E к ветви U ; β_{JI} – коэффициент передачи тока от источника J к ветви I ; R_{JU} – передаточное сопротивление от источника J к ветви U ; G_{EI} – передаточная проводимость от источника E к ветви I .

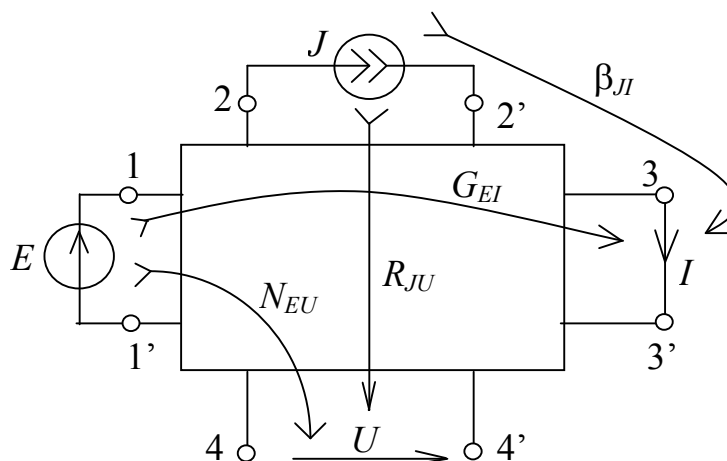


Рис. 1.1 Иллюстрация передаточных схемных функций

На рис. 1.1 прямоугольником отображена произвольная цепь, не содержащая непосредственно независимых источников; стрелки с оперением указывают направления передачи тока и напряжения. Ветви, содержащие источники E, J , называются передающими (или передатчиками), а ветви U, I – принимающими (или приемниками). В частном случае, если передающая J и принимающая U ветви включены параллельно (рис.1.2а), то передаточное сопротивление R_{JU} называют *входным сопротивлением* цепи $R_{\text{вх}}$. Если передающая E и принимающая I ветви соединены последовательно (рис.1.2б), то говорят о *входной проводимости* $G_{\text{вх}}$. Причем,

$$U_{\text{вх}} = R_{\text{вх}} J, \quad I = G_{\text{вх}} E. \quad (1.2)$$

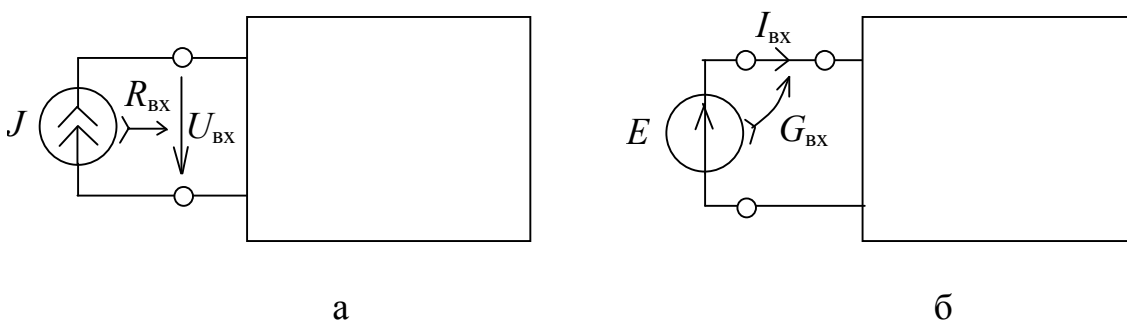


Рис.1.2. Иллюстрация входных функций: сопротивления (а), проводимости (б).

Определенные выше передаточные и входные функции являются схемными или системными. При дальнейшем изложении материала будем называть их *символьными схемными функциями* (ССФ), поскольку часть параметров элементов представляется в них символами. Таким образом, расчет цепи методом схемных определителей сводится к нахождению ССФ – коэффициентов передачи по напряжению и току, передаточных и входных сопротивлений и проводимостей. Схемно-алгебраические формулы (САФ) для нахождения ССФ [5] приведены в табл. П1 приложения. Перед анализом схемы целесообразно ее упростить, воспользовавшись правилами эквивалентных преобразований и упрощений, некоторые из которых даны в табл. П2 и П3.

В методе схемных определителей ССФ формируются без составления уравнений цепи – непосредственно по схеме на основе формулы

$$H = \frac{\Delta N}{\Delta D}, \quad (1.3)$$

где $\Delta N, \Delta D$ – определители схем, отображающих числитель и знаменатель (кратко – определители схем числителя и знаменателя) соответственно. Определители простейших схем сведены в табл. П4.

Построение схемы знаменателя производится на основе исходной цепи путем замыкания источника ЭДС E и размыкания источника тока J , в зависимости от того, какой из них находится в цепи. Для формирования схемы

числителя используется неудаляемый управляемый источник (НУИ), представленный на рис.1.3. НУИ содержит две ветви: приемник (рис.1.3 а) и генератор (рис.1.3 б). В отличие от других элементов схемы НУИ не может быть нейтрализован, то есть замыкание или размыкание его ветвей всегда приводит к образованию вырожденной схемы, что иллюстрируется табл. П5 и П6. Определитель вырожденной схемы тождественно равен нулю. Основные признаки вырождения схем отражены в табл. П7. Наиболее важные преобразования практических схем, содержащих НУИ, отражены в табл. 8.

Для получения схемы числителя НУИ включается в исходную схему следующим образом: приемник НУИ заменяет приемник напряжения или тока, сохраняя их направление, а генератор НУИ подсоединяется взамен источника ЭДС E или тока J и ориентируется противоположно их направлениям (см. табл. П1).



Рис.1.3 Схема НУИ: а) приемник; б) генератор

С учетом изложенного выше можно сделать вывод, что в методе схемных определителей (МСО) ССФ определяется как отношение определителей двух специально сформированных схем. Фактически искомую функцию, как показано в табл. П1, можно записать в виде особой схемно-алгебраической формулы (САФ), содержащей как алгебраические операции (деление и взятие определителя матрицы), так и схемные образы.

В качестве примера запишем САФ для определения коэффициента передачи напряжения K_{EU} . Из формулы (1.1) при $J=0$

$$K_{EU} = U / E .$$

Для получения САФ предварительно исключим из схемы на рис.1.1 источник J . При построении числителя источник ЭДС E заменим на генератор НУИ, а приемник U – на приемник НУИ. Для получения схемно-алгебраического выражения (САВ) знаменателя нейтрализуем источник ЭДС E . Полученная САФ имеет вид:

$$K_{EU} = \frac{\det \left[\begin{array}{c} \text{схема с НУИ-генератором и НУИ-приемником} \\ \text{и отсутствующим источником ЭДС E} \end{array} \right]}{\det \left[\begin{array}{c} \text{схема с отсутствующим источником ЭДС E} \end{array} \right]} , \quad (1.4)$$

где \det – алгебраическая операция взятия определителя схемы.

Аналогично могут быть получены САФ для других ССФ (см. табл. П1). Следует обратить внимание на САФ входных функций (см. №№ 5 и 6 в табл. П1). В этом случае параллельное соединение приемника и генератора НУИ эквивалентно короткозамкнутой перемычке, а последовательное – разрыву.

На основе рассмотренных САФ должны быть получены алгебраические формулы ССФ. Это достигается путем последовательных эквивалентных схемно-алгебраических преобразований САФ, а так же с помощью табличных определителей элементарных схем. Схемно-алгебраические преобразования (САП) основаны на формулах выделения параметров [1,4,5]. Выделение сопротивления R и проводимости G осуществляется следующим образом:

$$\Delta = R\Delta^R + \Delta_R; \quad \Delta = G\Delta_G + \Delta^G, \quad (1.5)$$

где Δ^R , Δ^G – определители производных схем, полученных удалением R и G соответственно; Δ_R , Δ_G – определители производных схем, полученных заменой ветвей R и G короткозамкнутыми ветвями (операцией стягивания ветвей R и G). С помощью этих формул или закона Ома (см. формулы (1.2)) вычислены и помещены в табл. П4 и П7 определители некоторых простейших схем, таких как разомкнутая и замкнутая в контур ветвь с проводимостью G , произвольная несвязная схема и т.д.

Выделение параметра χ управляемого источника (УИ) производится по формуле, аналогичной формулам (1.5),

$$\Delta = \chi\Delta(\chi \Rightarrow \text{НУИ}) + \Delta(\chi=0), \quad (1.6)$$

где $\Delta(\chi \Rightarrow \text{НУИ})$ – определитель первой производной схемы, образованной из исходной схемы путем преобразования УИ в НУИ; $\Delta(\chi=0)$ – определитель второй производной схемы, которая получена в результате нейтрализации УИ. Преобразование УИ в НУИ производится путем соответствующей замены приемника и генератора УИ приемником и генератором НУИ. Направления ветвей остается без изменения. Нейтрализация УИ осуществляется путем присвоения параметру УИ значения, равного нулю, в результате источник напряжения оказывается эквивалентен идеальному проводнику, а источник тока разомкнут.

Формулы (1.5) и (1.6), а также их частные варианты представлены в табл. П.9 в виде операций САП. В качестве упражнений получите частные случаи указанных формул, которые рассмотрены в табл. П10 и П11 с учетом особенностей вырождения и нейтрализации элементов, отраженных в табл. П5.

Для иллюстрации МСО приведем простой пример анализа делителя тока. В схеме на рис.1.4 необходимо определить в символьной форме ток в ветви R_2 .

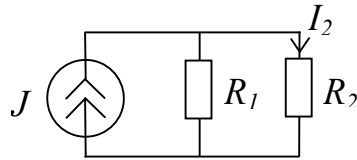


Рис.1.4. Делитель тока

Очевидно, ток $I_2 = \beta_{JR2} J$, где β_{JR2} – коэффициент передачи тока от источника J к ветви R_2 . Таким образом, необходимо построить ССФ β_{JR2} . Запишем САФ искомой функции в соответствии со строкой 4 в табл. П1:

$$\beta_{JR2} = \frac{\det \left[\begin{array}{c} \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \\ R_2 \\ \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \\ R_2 \end{array} \right]}{\det \left[\begin{array}{c} \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \\ R_1 \\ \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \\ R_2 \end{array} \right]} \quad (1.7)$$

Последовательно упростим (1.7). Используя строку 6 из табл. П11, стянем сопротивление R_2 в числителе, а в знаменателе найдем определитель элементарной схемы – контура из сопротивлений R_1 и R_2 (см. строку 6 табл. П4). В результате получаем

$$\beta_{JR2} = \frac{\det \left[\begin{array}{c} \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \\ R_1 \\ \downarrow \\ \downarrow \\ \downarrow \end{array} \right]}{R_1 + R_2}.$$

Теперь заменим в числителе параллельное однонаправленное соединение генератора и приемника НУИ короткозамкнутым отрезком (правило 1 из табл. П8) и найдем определитель получившейся в результате преобразования элементарной схемы – R -контура (правило 4 в табл. П4). Таким образом,

$$\beta_{JR2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Искомый ток

$$I_2 = \frac{R_1 J}{R_1 + R_2}.$$

Более сложные примеры будут представлены в следующих разделах.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПРИ ПОСТОЯННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В разделе поставлена цель – научить студентов находить и исследовать установившийся режим линейных цепей, содержащих резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, источники постоянного напряжения и тока. Такой режим цепей называют *статическим*.

2.1. Задание по расчету цепи при постоянном воздействии

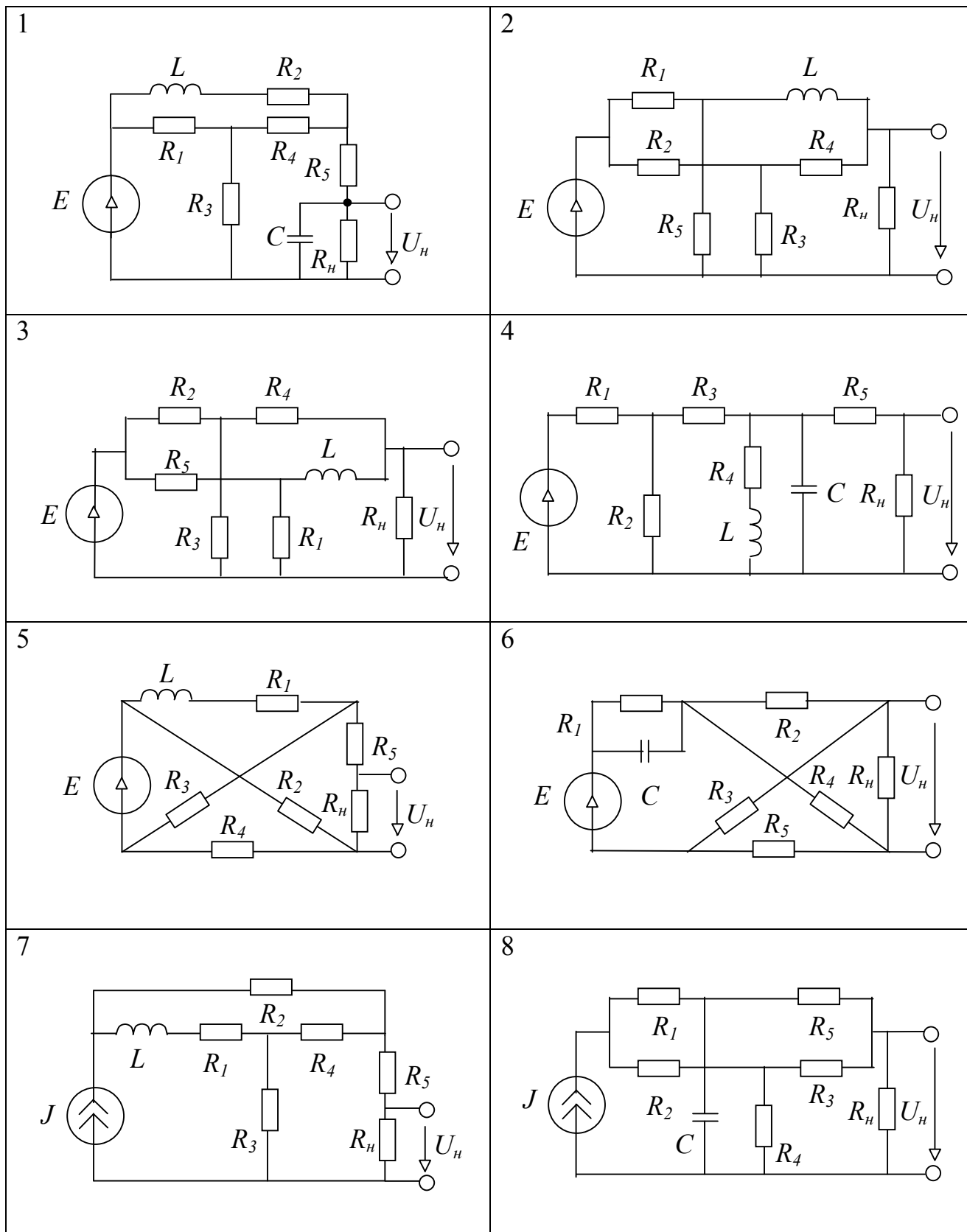
Дано:

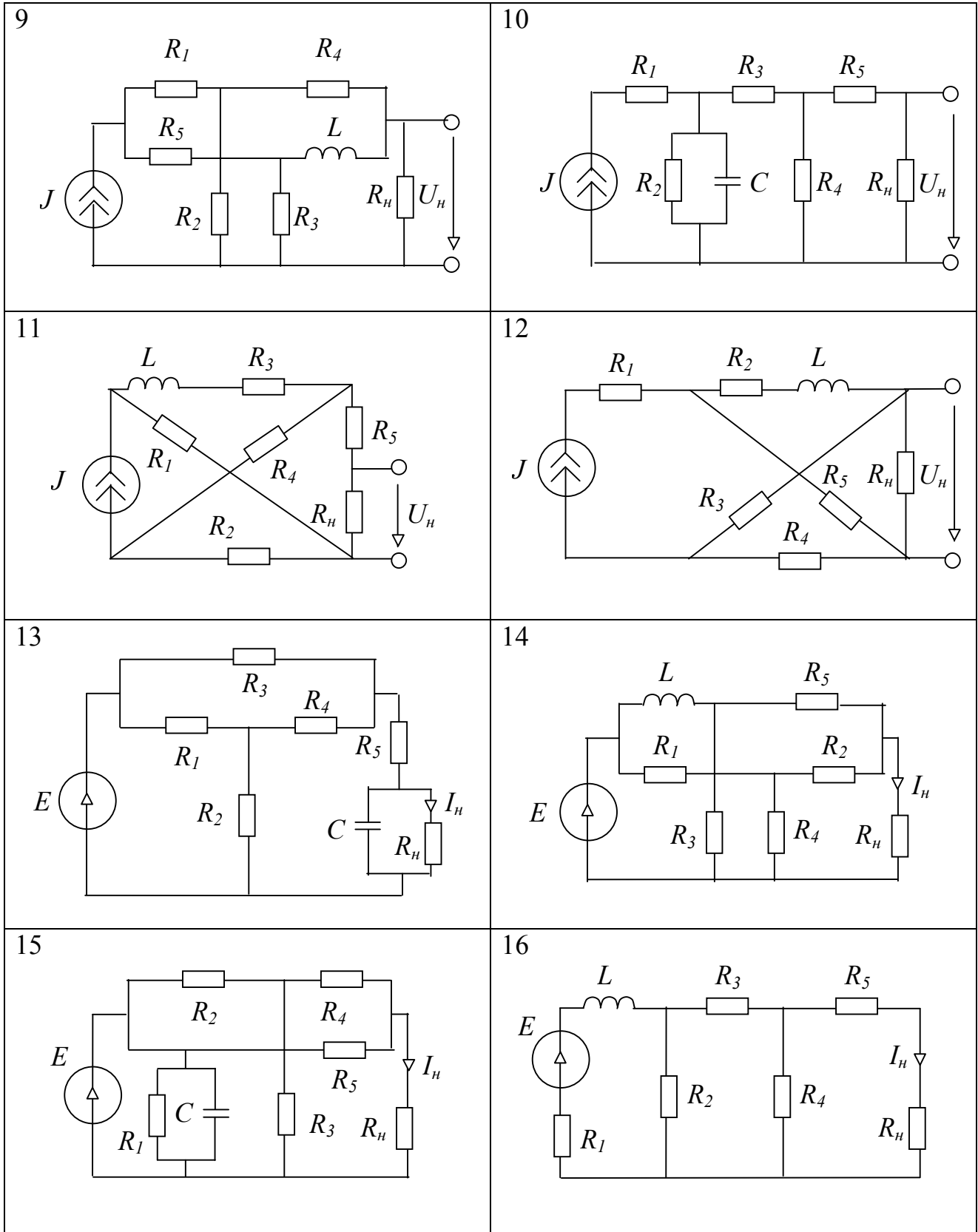
- 1) схема электрической цепи в соответствии с индивидуальным вариантом (таблица 2.1), содержащая только идеальные элементы;
- 2) параметры элементов в соответствии с групповым вариантом (таблица 2.2);
- 3) для схем, содержащих ЭДС и источник тока, $E = 2$ В и $J = 30$ мА соответственно.

Требуется:

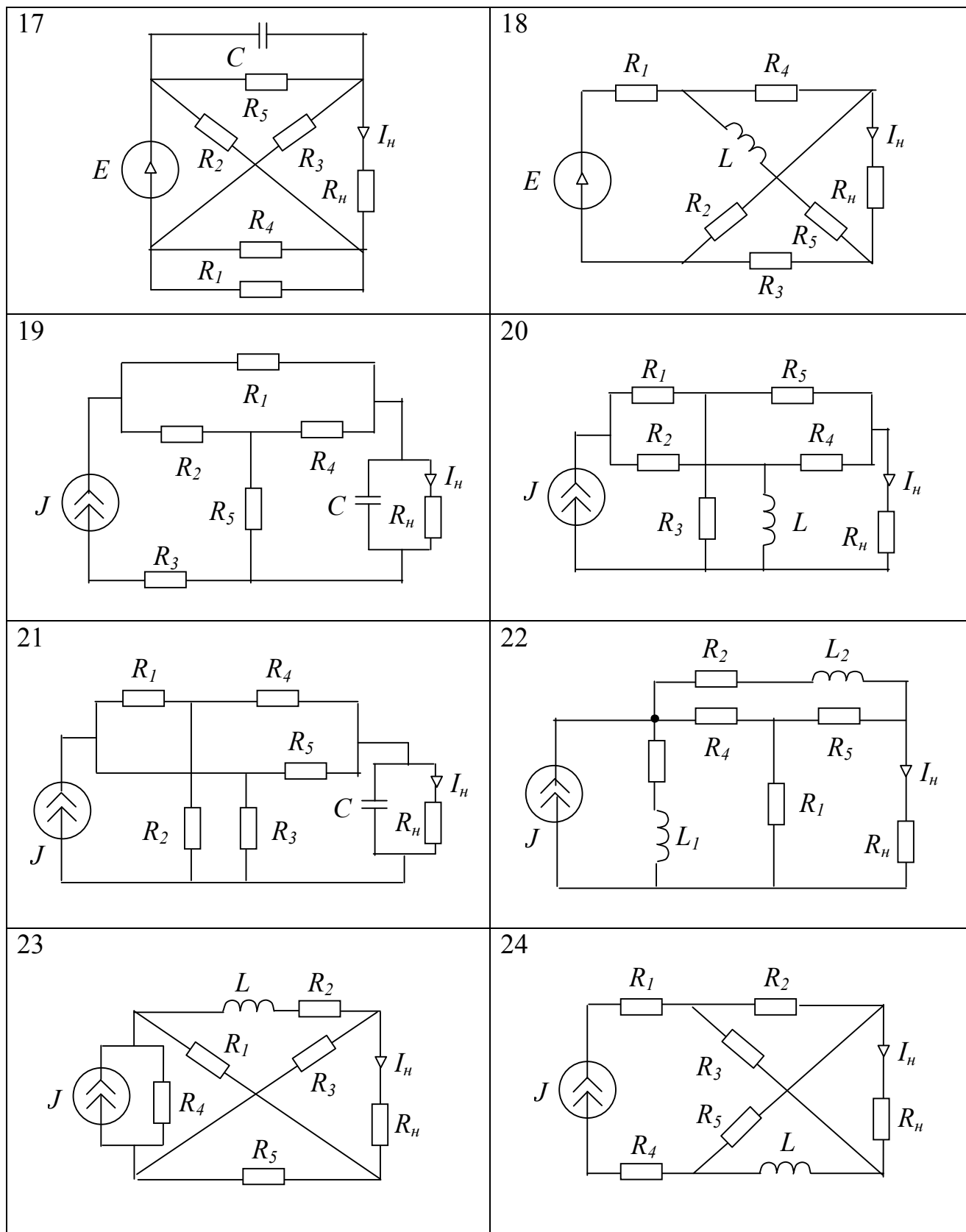
- 1) построить резистивную схему замещения по постоянному воздействию;
- 2) рассчитать произвольным матрично-численным методом (МКТ или МУН) токи и напряжения всех элементов цепи, включая конденсаторы и катушки индуктивности;
- 3) провести проверку решения, используя уравнения по законам Кирхгофа;
- 4) составить уравнения баланса мощности;
- 5) сформировать символьную схемную (системную) функцию (ССФ) $H=y/x$, где y – выходная величина (U_H или I_H – напряжение или ток нагрузки R_H) указана на заданной схеме; x – входная величина (ЭДС E или ток источника J);
- 6) найти численное значение U_H или I_H по ССФ при заданных численных значениях параметров элементов, убедиться в равенстве полученного результата соответствующему значению в матричном методе;
- 7) найти символьную функцию мощности на нагрузке $P_H(R_H)$;
- 8) исследовать символьные функции $H(R_H)$ и $P_H(R_H)$ на монотонность и наличие экстремумов, определить значение функций при $R_H = 0$ и $R_H \rightarrow \infty$;
- 9) построить графики функций $H(R_H)$ и $P_H(R_H)$ качественно (без вычислений).

Таблица 2.1
Исходные схемы при постоянном воздействии





Окончание табл. 2.1



Численные значения параметров элементов (групповые варианты)

Варианты номеров групп \ Параметры (в Ом)	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_H
1	100	200	300	400	500	600
2	200	300	400	500	400	800
3	1000	1500	2000	800	1200	1000
4	2000	1000	1500	1000	2500	2000
5	5000	800	2000	1500	3000	2500

2.2. Указания по выполнению задания

Построение резистивной схемы замещения исходной цепи рекомендуется проводить, используя известные схемы замещения реактивных элементов. Идеальный конденсатор при постоянном воздействии в установившемся режиме представляет собой разрыв цепи, а идеальная катушка индуктивности - короткозамкнутый участок цепи. Источники постоянного напряжения и тока, резисторы остаются в схеме замещения без изменений.

Для определения токов и напряжений всех ветвей рекомендуется применять матрично-численные методы - МУН или МКТ [1,2,3]. При использовании МУН все последовательные RE -ветви необходимо преобразовать в параллельные GJ -ветви. Если в цепи имеется идеальная E -ветвь, то число уравнений по МУН для этой схемы $n=q-2$, где q - общее число узлов. В этом случае один из узлов E -ветви принять за базисный узел, а для другого узла этой ветви уравнение составлять не требуется, поскольку его напряжение известно. При формировании уравнений для других узлов необходимо это учесть.

При использовании МКТ параллельная ветвь RJ должна быть преобразована эквивалентным путем к последовательной ветви RE . При наличии в цепи идеальной ветви J , последняя включается в одну из главных ветвей схемы. Число формируемых в этом случае уравнений по МКТ $n_k = p - q$, где p - число ветвей цепи.

При определении токов и напряжений реактивных элементов в исходной схеме следует учесть следующее: ток катушки индуктивности равен току, протекающему по соответствующему короткозамкнутому участку в схеме замещения, напряжение на конденсаторе равно напряжению, которое имеет место в схеме замещения между соответствующими точками разрыва. Ток конденсатора и напряжение на катушке индуктивности равны нулю.

При проверке баланса мощности в цепи следует воспользоваться формулой $P_u = P_{rs}$, где P_u – мощность источника энергии (источник в схеме один), P_{rs} – суммарная мощность резисторов. Следует обратить внимание на то, что мощность источника тока $P_J = UJ$ для случая, когда напряжение U и ток J противоположно направлены, а мощность источника ЭДС $P_E = EI$, если ЭДС и ток направлены согласно.

Приведем пример матрично-численного анализа цепи с помощью системы MathCAD. Исходная схема дана на рисунке 2.1а, а схема замещения по постоянному току – на рис. 2.1б. Далее в пункте 2.2.1 приводятся численные значения параметров элементов, необходимые формулы для расчета на языке системы MathCAD, и полученные результаты. Следует обратить внимание на то, что в силу особенностей входного языка системы MathCAD буквы и цифры, обозначающие принадлежность напряжения U , тока I или мощности P к соответствующему элементу или ветви, указаны не в качестве индексов, как обычно, а в одном ряду с символами U , I или P . Нижний индекс указанных символов обозначает порядковый номер элементов в соответствующем векторе (матрице-столбце).

2.2.1. Пример матрично-численного расчета цепи при постоянном воздействии в системе MathCAD

Исходная и расчетная схемы заданной электрической цепи представлены на рис. 2.1.

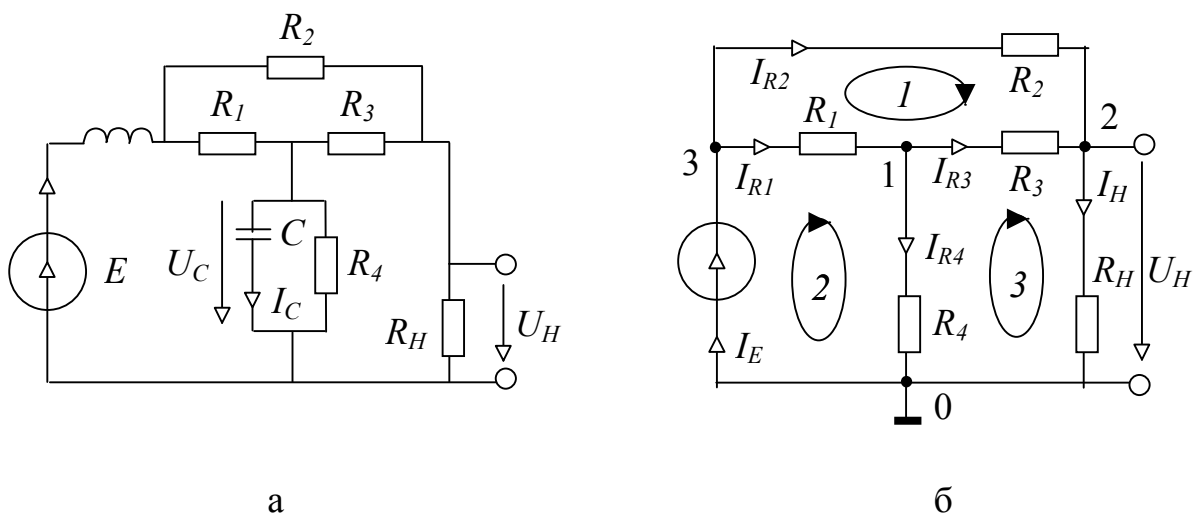


Рис. 2.1. Схемы для примера анализа цепи по постоянному воздействию: исходная (а) и замещения (б)

Исходные данные:

$$R1:=100 \text{ Ом}; R2:=200 \text{ Ом}; R3:=300 \text{ Ом}; R4:=400 \text{ Ом}; Rн:=500 \text{ Ом}; E:=10 \text{ В.}$$

Векторы сопротивлений и проводимостей ветвей:

$$\text{ORIGIN}:=1; i:=1..5;$$

$R1$	100		0.01
$R2$	200		0.005
$R := R3$;	$R := 300$	Ом;	$G_i := \frac{1}{R_i}$;
			$G = 0.003$ 1/Ом.
$R4$	400		0.003
$Rн$	500		0.002

Матрицы узловых проводимостей и токов:

$$Gy := \begin{matrix} G1 + G4 + G3 & -G3 \\ -G3 & G2 + G3 + G5 \end{matrix}; \quad Jy := \begin{matrix} G1 \cdot E \\ G2 \cdot E \end{matrix};$$

$$Gy = \begin{matrix} 0.016 & -0.003 \\ -0.003 & 0.01 \end{matrix} \text{ 1/Ом}; \quad Jy = \begin{matrix} 0.1 \\ 0.05 \end{matrix} \text{ А};$$

Вектор узловых напряжений:

$$U := Gy^{-1} \cdot Jy; \quad U := \begin{matrix} 7.869 \\ 7.377 \end{matrix} \text{ В};$$

Напряжения и токи элементов:

$$i:=1..5;$$

$(E - U_1)$	2.131		0.021
$(E - U_2)$	2.623		0.013
$UR := (U_1 - U_2)$;	$UR = 0.492$	В;	$IR_i := G_i \cdot UR_i$;
			$IR = 0.002$ А;
U_1	7.869		0.02
U_2	7.377		0.015

$$UC := UR4 ; IC := 0 \text{ А} ; UL := 0 \text{ В} ; IE := IR1 + IR2 ; IL := IE ; Iн := IR5 ;$$

$$UC = 7.869 \text{ В} ; IE = 0.034 \text{ А} ; IL = 0.034 \text{ А} ; Iн = 0.015 \text{ А}.$$

Проверка решения по законам Кирхгофа:

$$IR1 - IR3 - IR4 = 0 \text{ А};$$

$$IR2 + IR3 - IRн = 0 \text{ А};$$

$$IE - IR1 - IR2 = 0 \text{ А};$$

$$-UR1 + UR2 - UR3 = 0 \text{ В};$$

$$UR3 + UR5 - UR4 = 0 \text{ В};$$

$$UR1 + UR4 = 10 \text{ В}.$$

Баланс мощностей:

$$i:=1..5;$$

$$PE:=E \cdot IE; \quad PR:=\sum_i G_i \cdot (UR_i)^2;$$

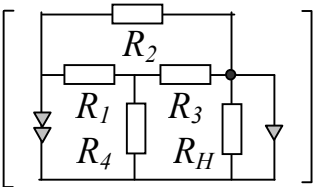
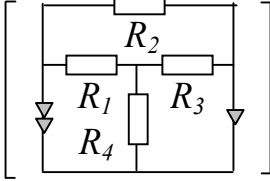
$$PE=0.344 \text{ Вт}; \quad PR=0.344 \text{ Вт}.$$

2.2.2. Схемно-символьный анализ цепи при постоянном воздействии

По заданию требуется сформировать ССФ для коэффициента передачи по напряжению $K=U_H/E$. Функция формируется в виде отношения двух символьных выражений (см. формулу (1.3)). Сначала построим числитель, а затем знаменатель этой функции. Соответствующие схемно-алгебраические операции сведем в табл. 2.3 и 2.4. Следует отметить, что сопротивление R_H выделяется при формировании числителя и знаменателя в первую очередь, поскольку в последующих пунктах задания требуется исследовать K при изменении именно этого параметра.

Таблица 2.3

Формирование числителя ССФ для схемы на рис. 2.1

№	Наименование операций и схемно-алгебраические выражения
1	2
1	<p>Построение исходного САВ числителя (см. строку 1 табл. П1)</p> <div style="text-align: center;">  $\Delta N = \det \left[\begin{array}{c} \text{Circuit diagram with } R_1, R_2, R_3, R_4, R_H \end{array} \right] \cdot$ </div>
2	<p>Выделение сопротивления R_H в соответствии со строкой 1 табл. П9</p> <div style="text-align: center;">  $\Delta N = R_H \det \left[\begin{array}{c} \text{Circuit diagram with } R_1, R_2, R_3, R_4 \end{array} \right] \cdot$ </div>

1	2
3	<p>Выделение сопротивления R_4 (см. строку 1 табл. П9)</p> $\Delta N = R_H \left[R_4 \det \left[\begin{array}{c} \text{---} R_2 \text{---} \\ \quad \\ \text{---} R_1 \text{---} \quad \text{---} R_3 \text{---} \\ \quad \\ \text{---} \end{array} \right] + \det \left[\begin{array}{c} \text{---} R_2 \text{---} \\ \quad \\ \text{---} R_1 \text{---} \quad \text{---} R_3 \text{---} \\ \quad \\ \text{---} \end{array} \right] \right] .$
4	<p>Исключение из первого слагаемого САВ (см. строку 3 настоящей таблицы) приемника и генератора НУИ, образующих сечение, в соответствии со строкой 3 табл. П8. Выделение R_1 и R_3 во втором слагаемом (см. строки 2 и 4 табл. П10)</p> $\Delta N = R_H \left\{ R_4 \det \left[\begin{array}{c} \text{---} R_2 \text{---} \\ \quad \\ \text{---} R_1 \text{---} \quad \text{---} R_3 \text{---} \\ \quad \\ \text{---} \end{array} \right] + R_1 R_3 \det \left[\begin{array}{c} \text{---} R_2 \text{---} \\ \quad \\ \text{---} \\ \quad \\ \text{---} \end{array} \right] \right\}$
5	<p>Нахождение в первом слагаемом САВ (см. строку 4 настоящей таблицы) определителя элементарной схемы – контура из сопротивлений – в соответствии со строкой 6 табл. П4. Исключение из второго слагаемого последовательного соединения приемника и генератора НУИ (см. строку 3 табл. П8)</p> $\Delta N = R_H \left\{ R_4 (R_1 + R_2 + R_3) + R_1 R_3 \det \left[\begin{array}{c} \text{---} R_2 \text{---} \\ \quad \\ \text{---} \end{array} \right] \right\} .$
6	<p>Вычисление определителя элементарной схемы – разомкнутого сопротивления R_2 – в соответствии со строкой 2 табл. П4. Запись окончательного САВ числителя</p> $\Delta N = R_H [R_4 (R_1 + R_2 + R_3) + R_1 R_3] .$

Таблица 2.4

Формирование знаменателя ССФ для схемы на рис.2.1

№	Наименование операций и схемно-алгебраические выражения
1	<p>Запись исходного САВ знаменателя в соответствии со строкой 1 табл. П1</p> $\Delta D = \det \left[\begin{array}{c} \text{---} \\ R_1 \parallel R_4 \parallel R_3 \parallel R_H \parallel R_2 \end{array} \right].$
2	<p>Выделение R_H (см. строку 1 табл. П9)</p> $\Delta D = R_H \det \left[\begin{array}{c} \text{---} \\ R_1 \parallel R_4 \parallel R_3 \parallel R_2 \end{array} \right] + \det \left[\begin{array}{c} \text{---} \\ R_1 \parallel R_4 \parallel R_3 \parallel R_2 \end{array} \right].$
3	<p>Выделение R_1 в первом слагаемом (см. строку 1 табл. П9), во втором слагаемом учет петли R_2 по формуле для схемы, состоящей из подсхем, имеющих один общий узел (см. строку 1 табл. П12) и выделение R_1 аналогично первому слагаемому</p> $\Delta D = R_H \left\{ R_1 \det \left[\begin{array}{c} \text{---} \\ R_4 \parallel R_3 \parallel R_2 \end{array} \right] + \det \left[\begin{array}{c} \text{---} \\ R_4 \parallel R_3 \parallel R_2 \end{array} \right] \right\} +$ $+ R_2 \left\{ R_1 \det \left[\begin{array}{c} \text{---} \\ R_4 \parallel R_3 \end{array} \right] + \det \left[\begin{array}{c} \text{---} \\ R_4 \parallel R_3 \end{array} \right] \right\}.$
4	<p>Нахождение определителя контуров из сопротивлений R_4, R_3, R_2 и сопротивлений R_4, R_3 согласно строке 6 табл. П4 и построение определителей схем, состоящих из подсхем, имеющих один общий узел (см. строку 1 табл. П12)</p> $\Delta D = R_H \left\{ R_1 (R_4 + R_3 + R_2) + \det \left[\begin{array}{c} \text{---} \\ R_4 \end{array} \right] * \det \left[\begin{array}{c} \text{---} \\ R_3 \parallel R_2 \end{array} \right] \right\} +$ $+ R_2 \left\{ R_1 (R_4 + R_3) + \det \left[\begin{array}{c} \text{---} \\ R_4 \end{array} \right] * \det \left[\begin{array}{c} \text{---} \\ R_3 \end{array} \right] \right\}.$
5	<p>Формирование определителей контуров из сопротивлений в соответствии со строками 4 и 6 табл. П4</p> $\Delta D = R_H \{ R_1 (R_4 + R_3 + R_2) + R_4 (R_3 + R_2) \} + R_2 \{ R_1 (R_4 + R_3) + R_4 R_3 \}.$

Таким образом, искомый коэффициент передачи напряжения

$$K = \frac{R_H [R_4 (R_1 + R_2 + R_3) + R_1 R_3]}{R_H [R_1 (R_4 + R_3 + R_2) + R_4 (R_3 + R_2)] + R_2 [R_1 (R_4 + R_3) + R_4 R_3]}. \quad (2.1)$$

Находим численное значение ССФ при заданных численных параметрах элементов. Достаточно подставить их в (2.1) и произвести соответствующие арифметические операции. В результате $K = 0.7377$, $U_H = KE = 7.377\text{В}$. Сравниваем полученное значение U_H с соответствующим численным значением в пункте 2.2.1. Они равны .

Сформируем символьную функцию мощности нагрузки:

$$P_H = \frac{U_H^2}{R_H} = \frac{(KE)^2}{R_H}$$

Единое выражение P_H с учетом K записывать не будем из-за его существенной длины (см. формулу (2.1)).

Представим полученные функции $K(R_H)$ и $P_H(R_H)$ в компактном виде:

$$K(R_H) = \frac{a_1 \cdot R_H}{b_1 R_H + b_0}, \quad P_H(R_H) = \frac{c \cdot R_H}{(b_1 R_H + b_0)^2}, \quad (2.2)$$

где $a_1 = R_4(R_1 + R_2 + R_3) + R_1 R_3$, $b_0 = R_2[R_1(R_4 + R_3) + R_4 R_3]$;

$$b_1 = R_1(R_2 + R_3 + R_4) + R_4(R_2 + R_3); \quad c = a_1^2 E^2.$$

Для исследования функций (2.2) следует использовать стандартные приемы из математического анализа [7]. Поскольку этот материал подробно изучается в курсах математики средней и высшей школы, здесь приведем лишь результаты исследований.

Функция $K(R_H)$ монотонно возрастающая, поскольку производная $dK/dR_H > 0$, экстремумов и разрывов не имеет. При $R_H = 0$ значение $K = 0$, а при $R_H \rightarrow \infty$ функция $K \rightarrow a_1/b_1 = 0.931$.

Функция $P(R_H)$ имеет максимум при $R_H = b_0/b_1 = 131.0$ Ом. Максимальное значение мощности $P_{max} = c/4b_0b_1 = 0,165$ Вт.

Графики $K(R_H)$ и $P(R_H)$ приведены на рис.2.2. Они строятся качественно (без вычислений), с указанием значений характерных точек. Это значения функций при $R_H = 0$, $R_H \rightarrow \infty$, а также точка, соответствующая P_{max} .

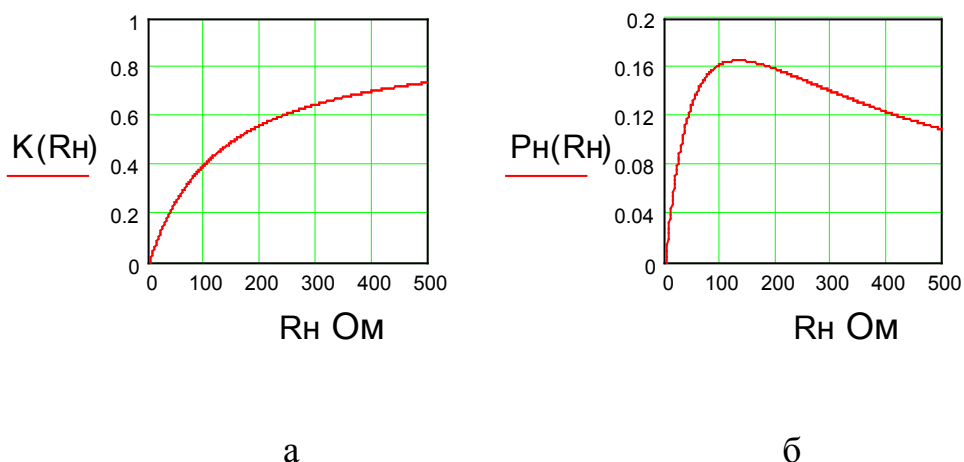


Рис. 2.2. Зависимости коэффициента передачи напряжения (а) и мощности нагрузки (б) от сопротивления нагрузки.

3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Для изучения методов анализа цепей при гармоническом воздействии предлагается определить характеристики режима электрических схем, содержащих резисторы, конденсаторы, взаимосвязанные катушки индуктивности, источники ЭДС и тока.

3.1. Задание по расчету режима цепи при гармоническом воздействии

Дано: 1) схема электрической цепи в соответствии с индивидуальным вариантом (табл. 3.1); 2) численные значения параметров элементов в соответствии с групповым вариантом (табл. 3.2), в качестве базисной гармонической функции принять функцию синуса.

Требуется:

1) определить токи и напряжения всех элементов цепи методом контурных токов, представить их в виде комплексных действующих или амплитудных значений;

2) составить систему независимых уравнений по законам Кирхгофа и подставить в них полученные числовые данные (проверка решения);

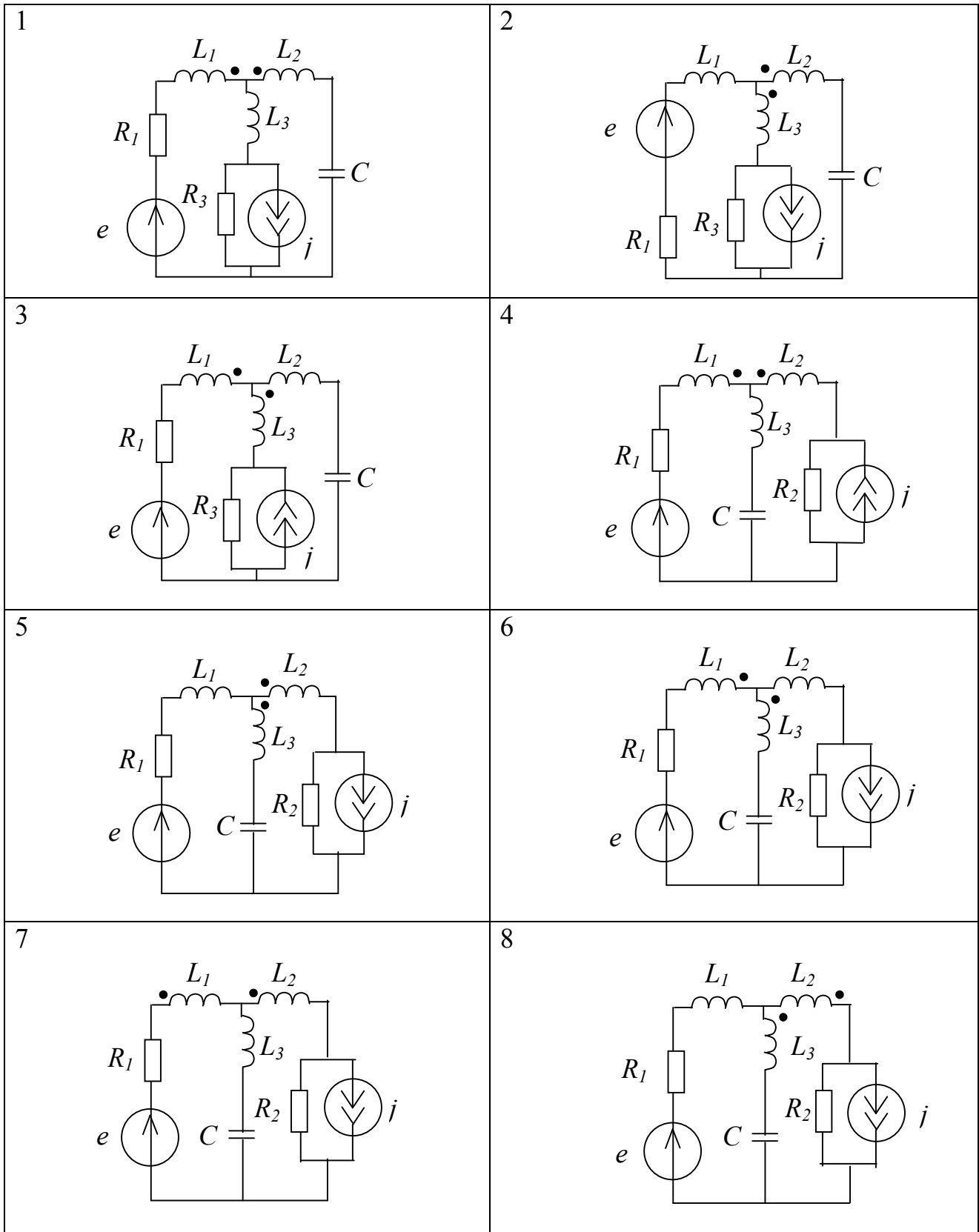
3) сформировать уравнения баланса активных и реактивных мощностей источников и пассивных элементов цепи (убедиться в правильности расчетов);

4) написать формулы для определения мгновенных значений напряжения взаимной индукции одной из катушек индуктивности и тока его индуцирующего, построить их графики;

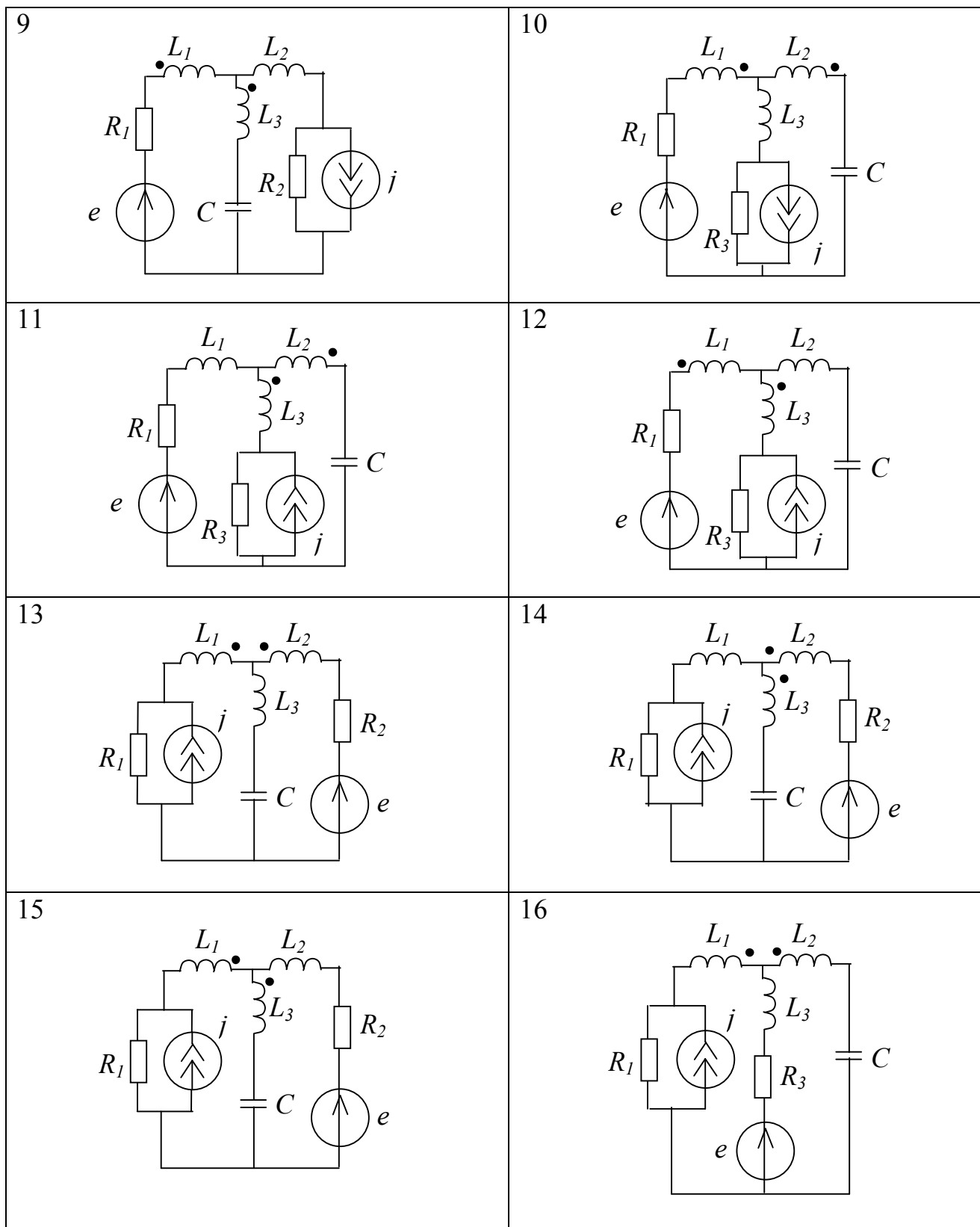
5) построить символьное выражение $U_c(p)$ при $J=0$;

6) используя полученное $U_c(p)$, найти символьное соотношение параметров, при котором действующее значение напряжения $U_c=0$ (напряжение источника ЭДС не равно нулю, а параметры элементов, в том числе частота источника, не могут принимать бесконечно большие значения).

Таблица 3.1
Цепи при гармоническом воздействии



Продолжение табл. 3.1



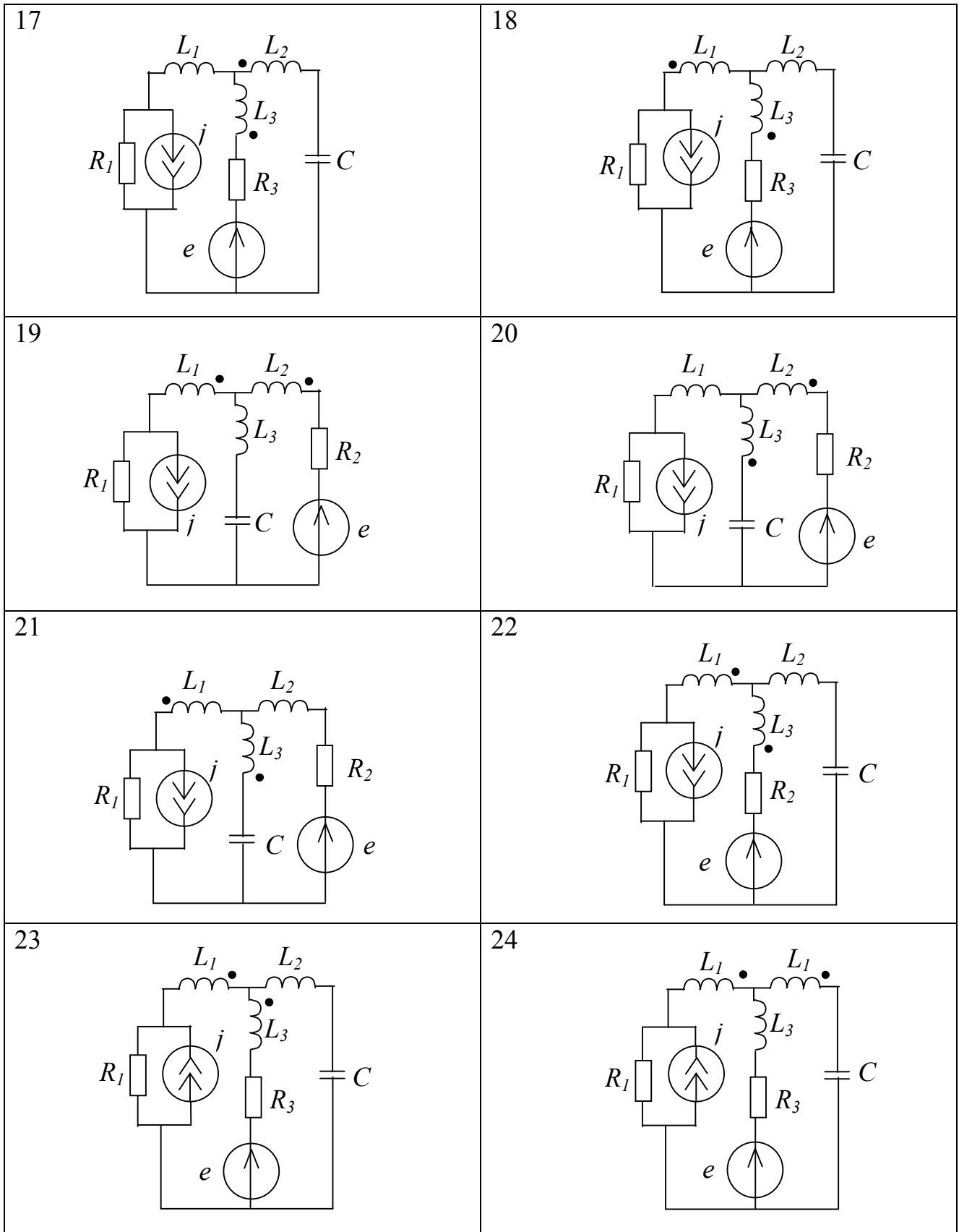


Таблица 3.2

**Численные значения параметров элементов цепей
при гармоническом воздействии (групповые варианты)**

Вариант \ Параметр	1	2	3	4	5
R_1 , Ом	10	12	14	18	20
R_2 , Ом	20	22	24	28	30
R_3 , Ом	30	32	34	38	40
C , мкФ	200	180	160	140	120
L_1 , мГн	32	15	20	12	10
L_2 , мГн	14	10	12	8	6
L_3 , мГн	20	10	14	10	5
k	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
E , В	80	60	40	50	20
J , А	0.8	1.0	0.6	0.4	0.5
φ_E , рад	$-\pi/6$	$\pi/4$	$\pi/2$	π	$2\pi/3$
φ_J , рад	$\pi/6$	$\pi/3$	π	$-\pi/2$	$3\pi/2$
f , Гц	400	200	50	100	600

3.2 Указания по выполнению задания

Для проведения матрично-численного анализа заданной цепи по МКТ необходимо построить комплексную схему замещения, определить комплексные сопротивления всех пассивных элементов. Напряжения и токи источников следует представить в виде комплексных действующих или амплитудных значений. Необходимо определить количество независимых контуров и наметить направление контурных токов, указать на схеме направление всех токов и напряжений.

Для примера покажем анализ цепи на рис.3.1а с помощью системы MathCAD. Комплексная схема замещения цепи представлена на рис. 3.1б. В этой схеме источник тока заменен эквивалентно на источник ЭДС \underline{E}_3 . Исходные данные, комплексные параметры, промежуточные и окончательные результаты расчета даны в пункте 3.2.1. Следует обратить внимание на то, что действующие комплексные напряжения и токи обозначены соответствующими заглавными латинскими буквами с подчеркиванием. У символов сопряженных комплексов имеется дополнительная черта – верхняя.

3.2.1 Пример матрично-численного расчета цепи при гармоническом воздействии в системе MathCAD.

Исходная и расчетная схемы заданной электрической цепи представлены на рис. 3.1.

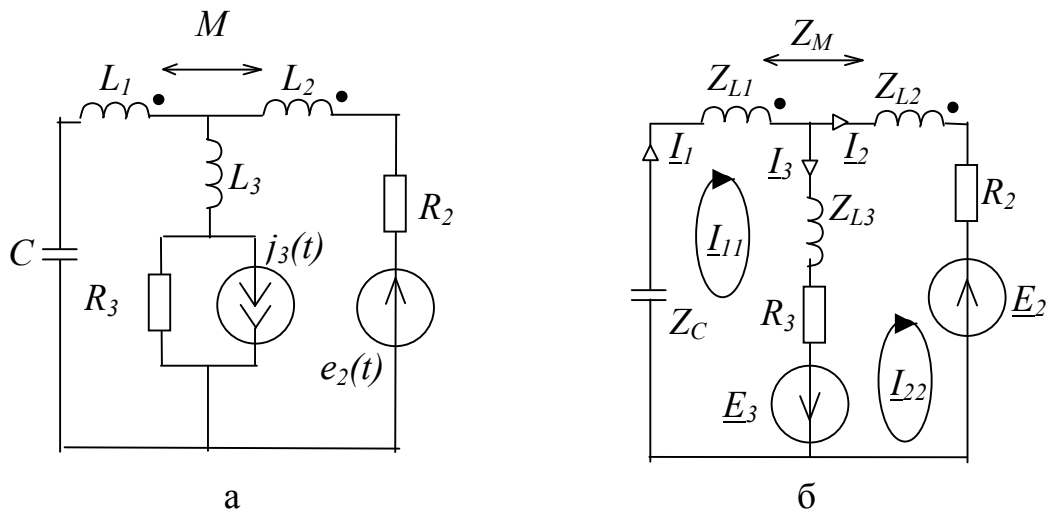


Рис.3.1. Электрическая схема для примера: исходная схема (а), комплексная схема замещения (б) для построения уравнений по МКТ

Исходные данные:

$$R2:=8 \text{ Ом}; R3:=10 \text{ Ом}; C:=10^{-4} \text{ Ф}; k:=0.6 \quad f:=100 \text{ Гц}; J3:=0.5 \text{ А}; \\ L1:=0.015 \text{ Гн}; L2:=10^{-2} \text{ Гн}; L3:=10^{-2} \text{ Гн}; E2:=120 \text{ В}; \varphi E:=0; \varphi J:=0.$$

Параметры элементов комплексной схемы замещения:

$$\begin{aligned} \omega &:= 2\pi f; & j &:= \sqrt{-1}; & M &:= k \cdot \sqrt{L1 \cdot L2}; \\ XL1 &:= \omega L1; & XL2 &:= \omega L2; & XL3 &:= \omega L3; & XC &:= \frac{-1}{\omega C}; \\ ZL1 &:= j \cdot XL1; & ZL2 &:= j \cdot XL2; & ZL3 &:= j \cdot XL3; & ZM &:= j \cdot \omega \cdot M; \\ ZC &:= j \cdot XC; & \underline{E2} &:= E2 \cdot e^{j \cdot \varphi E}; & \underline{J3} &:= J3 \cdot e^{j \cdot \varphi J}; & \underline{E3} &:= R3 \cdot \underline{J3}; \\ ZL1 &= 9.425j \text{ Ом}; & ZL2 &= 6.283j \text{ Ом}; & ZL1 &= 6.283j \text{ Ом}; & ZM &= 4.617j \text{ Ом}; \\ ZC &= -15.915j \text{ Ом}; & \underline{E2} &= 120 \text{ В}; & \underline{J3} &= 0.5 \text{ А}; & \underline{E3} &= 5 \text{ В}. \end{aligned}$$

Матрицы по методу контурных токов:

$$\begin{aligned} Z_{11} &:= Z_C + Z_{L1} + Z_{L3} + R_3; & \text{ORIGIN} &:= 1; \\ Z_{12} &:= -R_3 - Z_{L3} + Z_M; & \underline{E}_{11} &:= \underline{E}_3; \\ Z_{21} &:= Z_{12}; \\ Z_{22} &:= R_2 + R_3 + Z_{L2} + Z_{L3}; & \underline{E}_{22} &:= -(\underline{E}_2 + \underline{E}_3); \end{aligned}$$

$$\underline{Z} := \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix}; \quad \underline{E} := \begin{pmatrix} \underline{E}_{11} \\ \underline{E}_{22} \end{pmatrix};$$

$$\underline{Z} = \begin{pmatrix} 10 - 0.208j & -10 - 1.666j \\ -10 - 1.666j & 18 + 12.566j \end{pmatrix} \text{ Ом}; \quad \underline{E} = \begin{pmatrix} 5 \\ -125 \end{pmatrix} \text{ В.}$$

Определение контурных токов (комплексных действующих значений):

$$\underline{I}_k := \underline{Z}^{-1} \cdot \underline{E}; \quad \underline{I}_k = \begin{pmatrix} -7.392 + 5.968j \\ -6.566 + 7.216j \end{pmatrix} \text{ А}$$

Токи ветвей:

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &:= \underline{I}_{k1}; & \underline{I}_1 &= -7.392 + 5.968j \text{ А} \\ \underline{I}_2 &:= \underline{I}_{k2}; & \underline{I}_2 &= -6.566 + 7.216j \text{ А} \\ \underline{I}_3 &:= \underline{I}_{k1} - \underline{I}_{k2}; & \underline{I}_3 &= -0.826 - 1.247j \text{ А} . \end{aligned}$$

Напряжения (комплексные действующие значения) элементов:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{M1} &:= Z_M \cdot \underline{I}_2; & \underline{U}_{M1} &= -33.315 - 30.317j \text{ В}; \\ \underline{U}_{M2} &:= Z_M \cdot \underline{I}_1; & \underline{U}_{M2} &= -27.556 - 34.131j \text{ В}; \\ \underline{U}_C &:= Z_C \cdot \underline{I}_1; & \underline{U}_C &= 94.987 - 117.65j \text{ В}; \\ \underline{U}_{L2} &:= Z_{L2} \cdot \underline{I}_2 + \underline{U}_{M2}; & \underline{U}_{L2} &= -72.8935 - 75.388j \text{ В}; \\ \underline{U}_{R2} &:= R_2 \cdot \underline{I}_2; & \underline{U}_{R2} &= -52.53 + 57.724j \text{ В}; \\ \underline{U}_{L1} &:= Z_{L1} \cdot \underline{I}_1 + \underline{U}_{M1}; & \underline{U}_{L1} &= -89.565 - 99.987j \text{ В}; \\ \underline{U}_{L3} &:= Z_{L3} \cdot \underline{I}_3; & \underline{U}_{L3} &= 7.837 - 5.19j \text{ В}; \\ \underline{U}_{R3} &:= R_3 \cdot \underline{I}_3; & \underline{U}_{R3} &= -8.26 - 12.473j \text{ В}. \end{aligned}$$

Проверка решения по законам Кирхгофа:

$$\underline{I}_1 - \underline{I}_2 - \underline{I}_3 = 0 \text{ А};$$

$$\underline{U}_C + \underline{U}_{L1} + \underline{U}_{L3} + \underline{U}_{R3} = 5 \text{ В}; \quad \underline{E} = \begin{pmatrix} 5 \\ -125 \end{pmatrix} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{L2} + \underline{U}_{R2} - (\underline{U}_{L3} + \underline{U}_{R3}) = -125 \text{ В.}$$

Проверка баланса мощности:

$$\underline{SE2} := \underline{E2} \cdot \overline{I2}; \quad \underline{SE3} := \underline{E3} \cdot \overline{I3}; \quad \underline{SE} := \underline{SE2} + \underline{SE3};$$

$$\underline{PR2} := R2 \cdot (|\underline{I2}|)^2; \quad \underline{PR3} := R3 \cdot (|\underline{I3}|)^2; \quad \underline{QC} := XC \cdot (|\underline{I1}|)^2;$$

$$\underline{SL1} := \underline{UL1} \cdot \overline{I1}; \quad \underline{SL2} := \underline{UL2} \cdot \overline{I2}; \quad \underline{QL3} := \underline{XL3} \cdot (|\underline{I3}|)^2$$

$$\underline{PE} := \text{Re}(\underline{SE}); \quad P := \underline{PR2} + \underline{PR3} + \text{Re}(\underline{SL1} + \underline{SL2});$$

$$\underline{QE} := \text{Im}(\underline{SE}); \quad Q := \underline{QC} + \underline{QL3} + \text{Im}(\underline{SL1} + \underline{SL2});$$

$$\underline{PE} = 783.813 \text{ Вт}; \quad P = 783.813 \text{ Вт};$$

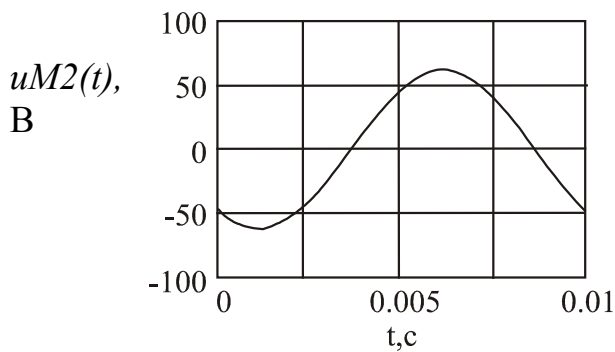
$$\underline{QE} = 872.103 \text{ ВА}; \quad Q = 872.103 \text{ ВА}.$$

Мгновенные значения напряжения взаимоиндукции $uM2(t)$ и тока $i1(t)$

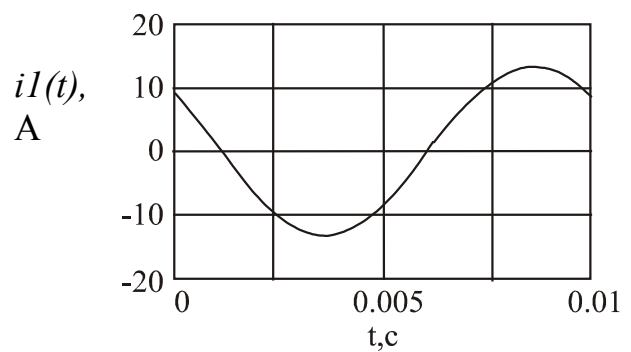
$$t := 0,01 \cdot 10^{-3} \dots 10 \cdot 10^{-3};$$

$$uM2(t) := |\underline{UM2}| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(\underline{UM2}));$$

$$i1(t) := |\underline{I1}| \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega \cdot t + \arg(\underline{I1})).$$



a



б

Рис. 3.2. Графики напряжения $uM2(t)$ (а) и тока $i1(t)$ (б).

3.2.2. Схемно-символьный анализ цепи при гармоническом воздействии

Рассмотрим схемно-символьный анализ цепи на рис.3.1а. Сформируем сначала символьное выражение для искомого напряжения на конденсаторе в операторной форме. Для этого будем использовать комплексный метод. Примем формально $j\omega = p$, назовем переменную p оператором. Построим на основе комплексной схемы замещения (рис.3.1 б) операторную схему на рис. 3.3. Комплексные сопротивления катушек индуктивности Z_{L1} , Z_{L2} , Z_{L3} заменим соответственно на операторные сопротивления $Z_{L1}(p)=pL_1$; $Z_{L2}(p)=pL_2$; $Z_{L3}(p)=pL_3$, конденсатор представим операторной проводимостью $Y_C(p)=pC$, источник ЭДС – операторной функцией $E_2(p)$, резисторы оставим без изменений. Дополнительно, в соответствии с заданием нейтрализуем путем стягивания источник ЭДС $E_2(p)$.

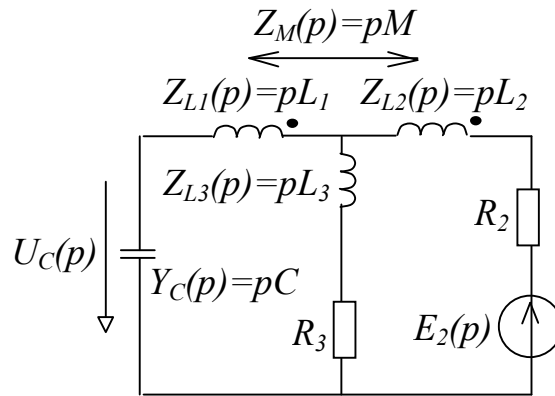


Рис. 3.3. Операторная схема замещения

Искомое операторное напряжение $U_C(p) = K_{E_2C}(p)E_2(p)$, где коэффициент передачи напряжения (от источника $E_2(p)$ к конденсатору С) $K_{E_2C}(p) = \Delta N(p)/\Delta D(p)$, (3.1) причем $\Delta N(p)$ и $\Delta D(p)$ получаются в операторной форме. Схемы, определители которых равны $\Delta N(p)$ и $\Delta D(p)$, представлены на рис. 3.4 а и б соответственно.

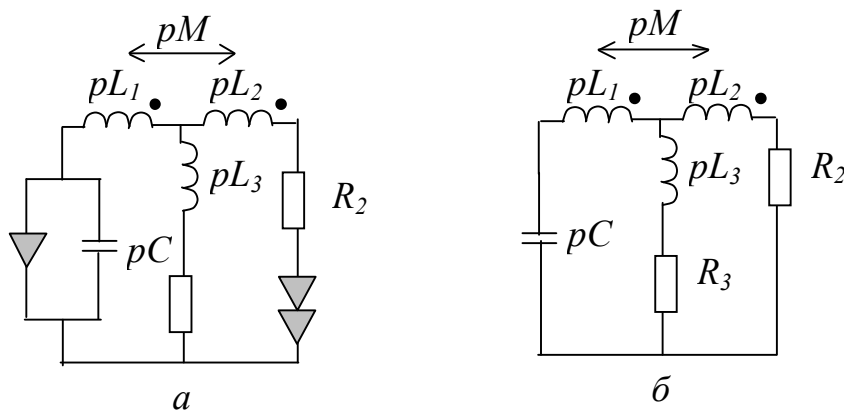
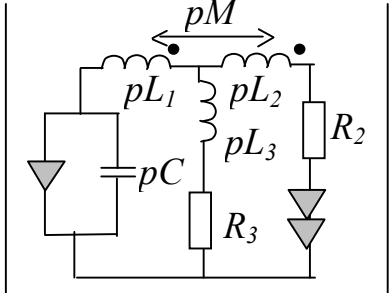
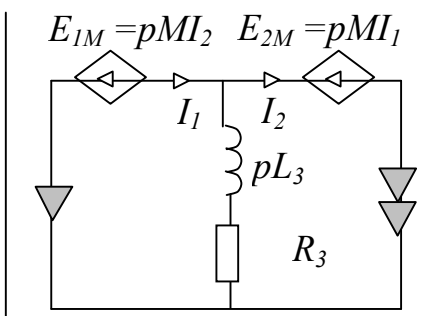
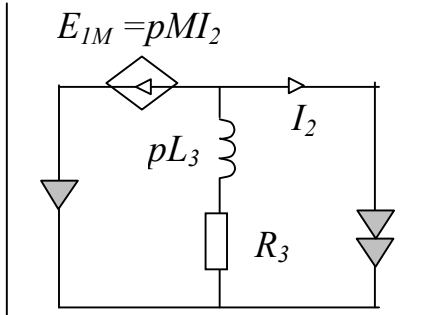


Рис. 3.4. Схемы, отображающие числитель (а) и знаменатель (б) $K_{E_2C}(p)$

Операции построения числителя и знаменателя приводятся в табл. 3.4 и табл. 3.5.

Таблица 3.4

Формирование числителя функции $K_{E2C}(p)$ для схемы на рис. 3.4

№	Наименование операций и схемно-алгебраическое выражения
1	2
1	<p>Исходное САВ числителя (см. рис. 3.4 а)</p> <div style="text-align: center;"> $\Delta N =$  </div>
2	<p>Замена индуктивной связи управляемыми источниками в соответствии со строкой 1 табл. П13, удаление проводимости pC согласно строке 4 и стягивание сопротивлений pL_1, pL_2, R_2 согласно строке 6 и 8 (см. табл. П11)</p> <div style="text-align: center;"> $\Delta N =$  </div>
3	<p>Нейтрализация источника E_{2M} по правилу 14 из табл. П11</p> <div style="text-align: center;"> $\Delta N =$  </div>

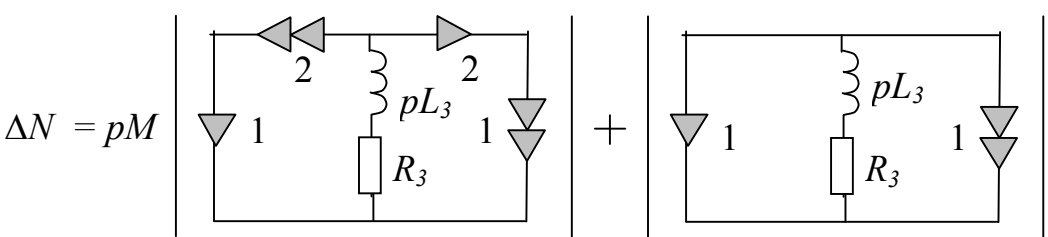
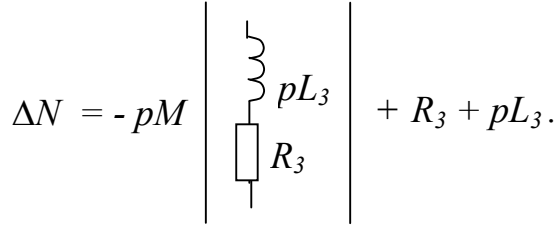
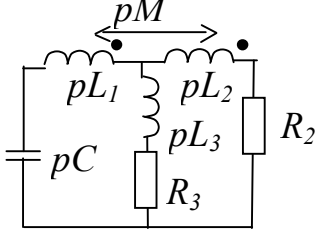
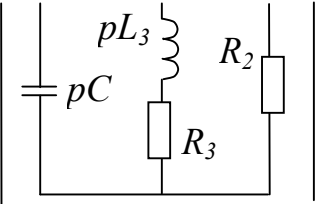
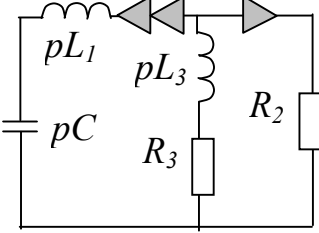
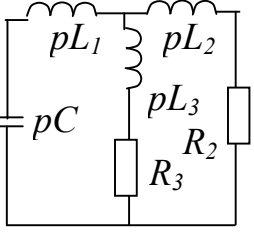
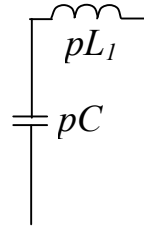
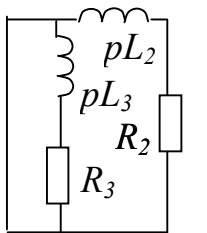
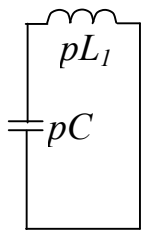
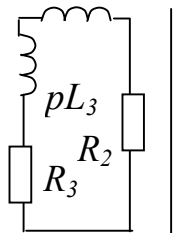
1	2
4	<p>Выделение параметра ИНУТ (см. строку 3 табл. П9)</p>  <p>$\Delta N = pM$</p>
5	<p>Изменение нумерации приемников НУИ согласно строки 6 табл. П8. Замена параллельного соединения генератора и приемника НУИ отрезком проводника (см. строку 1 табл. П8)</p>  <p>$\Delta N = -pM$</p>
6	<p>Исключение из схемы встречного последовательного соединения генератора и приемника НУИ в соответствии со строкой 3 табл. П8. Запись определителя элементарной схемы – z-контура согласно строке 4 табл. П4</p>  <p>$\Delta N = -pM$</p> <p>$+ R_3 + pL_3.$</p>
7	<p>Вычисление определителя элементарной схемы – разомкнутой z-ветви (см. строку 2 из табл. П4). Запись окончательного выражения числителя</p> <p>$\Delta N = -pM + R_3 + pL_3.$</p>

Таблица 3.5
Формирование знаменателя функции $K_{E2C}(p)$

№	Наименование операций и схемно-алгебраические выражения
1	<p>Исходное САВ знаменателя (см. рис. 3.3б)</p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> $\Delta D =$  </div>
2	<p>Выделение взаимной индуктивности (см. строку 2 табл. П13)</p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> $\Delta D = -p^2 M^2$  $+$ $+ 2pM$  $+$  </div>
3	<p>Нахождение в первом слагаемом определителя схемы, разделимой по одному узлу (см. строку 1 табл. П12). Во втором слагаемом стягивание сопротивлений pL_1 и R_2 (см. строки 6 и 8 табл. П11), выделение проводимости pC (см. строку 6 табл. П10), что приводит к схеме в виде параллельного соединения R_3 и pL_3 (см. строку 4 табл. 3.4). Применение к определителю третьего слагаемого формулы разложения по двум узлам (см. строку 2 табл. П12).</p> $\Delta D = -p^3 M^2 C + 2pM[pC(R_3 + pL_3)] +$ <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center; margin-top: 10px;"> $+$  $*$  $+$  $*$  </div>
4	<p>В результате получаем</p> $\Delta D = -p^3 M^2 C + 2p^2 M C (R_3 + pL_3) + pC [(R_3 + pL_3)(R_2 + pL_2)] + (p^2 C L_1 + I) [R_2 + R_3 + p(L_2 + L_3)].$

Таким образом, операторное напряжение

$$U_C(p) = \frac{[R_3 + p(L_3 - M)]E_2(p)}{-p^3 M^2 C + 2p^2 MCZ_3 + pCZ_2 Z_3 + pCL_1(Z_2 + Z_3)}, \quad (3.2)$$

где $Z_2 = R_2 + pL_2$; $Z_3 = R_3 + pL_3$.

Заменим в (3.2) оператор p на $j\omega$. В результате действующее напряжение

$$U_C = |U_C(j\omega)| = \frac{|\Delta N(j\omega)|}{|\Delta D(j\omega)|} \quad (3.3)$$

где модуль числителя:

$$|\Delta N(j\omega)| = E_2 \cdot \sqrt{R_3^2 + \omega^2(L_3 - M)^2}$$

модуль знаменателя:

$$|\Delta D(j\omega)| = \sqrt{A^2 + B^2},$$

где $A = R_2 + R_3 - \omega^2 C[R_3(L_1 + L_2 + 2M) + R_2(L_1 + L_3)]$;

$$B = -\omega^3 C[-M^2 + 2ML_3 + L_3(L_1 + L_2) + L_1 L_2] + \omega(R_2 R_3 C + L_2 + L_3).$$

Теперь найдем соотношение параметров, при котором $U_C = 0$. Очевидно, $U_C = 0$, если $K_{E_2 C} = 0$. Коэффициент $K_{E_2 C}$ может быть равен нулю при условии, что числитель равен нулю или знаменатель принимает бесконечно большое значение. Последнее условие при конечных значениях параметров невозможно.

Числитель равен нулю, если $R_3 = 0$ и $L_3 - M = 0$. Это и есть ответ на поставленный в задаче вопрос.

4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА ПО РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЙ РАБОТЕ

Отчет представляется студентами отдельно по каждому из двух заданий. Должен содержать: 1) титульный лист с указанием названия университета, кафедры электроснабжения, названия РГР, фамилии и инициалов студента; 2) содержание задания; 3) текст, изложенный в соответствии с заданием.

Оформляется отчет на белой или клетчатой бумаге формата А4 или близкой к нему. Листы располагаются вертикально (книжная ориентация). Допускается использовать листы с двух сторон. Поля: сверху, снизу, слева – 20 мм, справа – 10 мм. Текст может быть печатным или рукописным, при этом используются чернила или паста темного цвета. Формулы заполняются аккуратно и, при наличии ссылок на них, нумеруются справа в круглых скобках. Ссылки на формулы выполняются также в круглых скобках. Рисунки даются с обязательной нумерацией, с указанием подписей. Изображение электрических схем должны соответствовать требованиям ЕСКД. Нумерация страниц в отчете сквозная. Номер указывается справа в верхнем углу листа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, преимуществом символьного представления решения по сравнению с численным решением является возможность исследовать общие свойства схемных функций: условия разрешимости задачи, наличие нулей, полюсов, экстремумов, разрывов, пределов функций. Достоинством рассмотренного метода схемных определителей по сравнению с матричными методами (узловых напряжений, контурных токов) является отсутствие необходимости составления и решения уравнений схемы.

По сравнению с другими топологическими методами [1,2] метод схемных определителей не требует применения теоретико-множественного или графового аппаратов, позволяет получить решение непосредственно по схеме без образования взаимно уничтожающихся слагаемых в выражениях ССФ. При анализе сложных схем необходимо использовать формулы, предусматривающие деление схемы на части, которые представлены в табл. П12.

Метод схемных определителей в отличие от других методов лишен ограничений на тип используемых линейных элементов. В этом методе обеспечивается непосредственное задание всех четырех типов управляемых источников (см. табл. П9). Кроме того, в табл. П13 помещены схемно-алгебраические формулы для выделения параметров основных трех- и четырехполюсников, которые используются при проектировании электронных средств. Применение этих формул исключает переход к схеме замещения, содержащей управляемые источники, что позволяет упростить нахождение схемных функций.

Рекомендуется начинать изучение метода схемных определителей с запоминания табл. П1; 1,2,3,4,5,10 строк из табл. П4 и первых двух строк табл. 9, что достаточно для анализа простых схем без управляемых источников.

Глубокое овладение методом схемных определителей вовсе не требует формального запоминания 13 таблиц, помещенных в приложении. Скорее эти таблицы являются упражнениями, после рассмотрения которых объем информации, требующей запоминания, сократится в несколько раз. Например, наиболее объемные табл. П10 и П11 являются следствиями табл. П9 и П5. Содержание табл. П5 и П6 обуславливают фундаментальные физические свойства элементов схемы и законы Кирхгофа, которые безусловно должен знать каждый студент. Для проверки студентами правильности схемно-алгебраических выражений, помещенных в третий столбец табл. П13, используются схемы замещения, приведенные в первом столбце. Эта таблица может быть расширена самими студентами путем добавления в нее новых схемных элементов и соответствующих схемно-алгебраических выражений.

ПРИЛОЖЕНИЕ

*Метод схемных определителей
в таблицах и рисунках*

Схемно-алгебраические формулы схемных функций





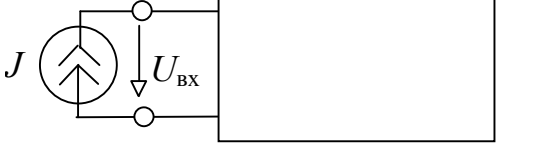
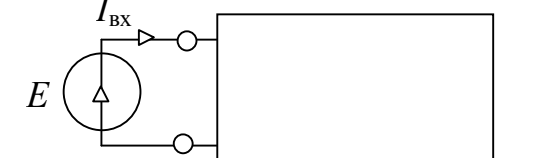
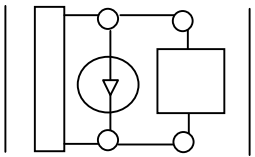
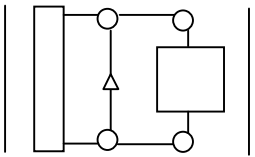
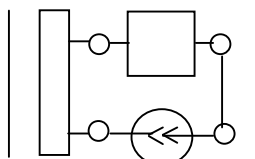
№	Исходная схема	Схемная формула
1	<p style="text-align: center;">Коэффициент передачи по напряжению</p> 	$K_{EU} = U/E = \frac{\left \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \downarrow \quad \downarrow \\ \text{---} \text{---} \end{array} \right }{\left \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \end{array} \right }$
2	<p style="text-align: center;">Передаточная проводимость</p> 	$Y_{EI} = I/E = \frac{\left \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \downarrow \quad \downarrow \\ \text{---} \text{---} \end{array} \right }{\left \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \end{array} \right }$
3	<p style="text-align: center;">Передаточное сопротивление</p> 	$Z_{JU} = U/J = \frac{\left \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \downarrow \quad \downarrow \\ \text{---} \text{---} \end{array} \right }{\left \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \end{array} \right }$
4	<p style="text-align: center;">Коэффициент передачи по току</p> 	$B_{JI} = I/J = \frac{\left \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \downarrow \quad \downarrow \\ \text{---} \text{---} \end{array} \right }{\left \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \end{array} \right }$
5	<p style="text-align: center;">Входное сопротивление</p> 	$Z_{JU} = U_{\text{вх}}/J = \frac{\left \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \end{array} \right }{\left \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \end{array} \right }$
6	<p style="text-align: center;">Входная проводимость</p> 	$Y_{EI} = I_{\text{вх}}/E = \frac{\left \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \end{array} \right }{\left \begin{array}{c} \text{---} \text{---} \text{---} \\ \text{---} \text{---} \end{array} \right }$

Таблица П2

Правила эквивалентных преобразований схем

№	Исходная схема	Эквивалентная схема
1	Последовательное соединение z-ветвей	
2	Параллельное соединение y-ветвей	
3	Последовательное соединение ИНУТ	
4	Параллельное соединение ИТУН	
5	Последовательно-параллельное соединение ИТУТ	
6	Параллельно-последовательное соединение ИНУН	

Эквивалентные упрощения схем перед нахождением схемных функций

№	Исходная схема	Эквивалентная схема
1	Удаление двухполюсника, параллельного источнику напряжения	
		
2	Удаление двухполюсника, параллельного приемнику тока – амперметру	
		
3	Стягивание двухполюсника, соединенного последовательно с независимым источником тока	
		
4	Стягивание двухполюсника, соединенного последовательно с приемником напряжения – вольтметром	
		

Примечание: Двухполюсник, оставляемый в схеме после ее преобразования, содержит приемники тока или напряжения (см. строки 1 и 3) или независимые источники энергии (см. строки 2 и 4). Исключаемый двухполюсник таких источников не содержит, как не содержит приемников с искомым током или напряжением.

Таблица П4
Определители простейших схем


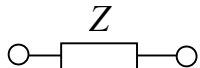
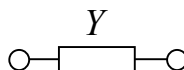
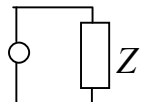
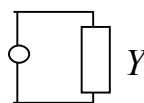
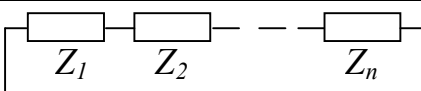
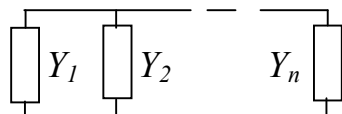
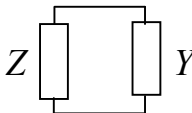


№	Схема, отображающая определитель	Величина определителя
1	Схема, состоящая из одного узла	
		$\Delta=1$
2	Разомкнутая ветвь с сопротивлением Z	
		$\Delta=1$
3	Разомкнутая ветвь с проводимостью Y	
		$\Delta=Y$
4	Замкнутая ветвь (петля) с сопротивлением Z	
		$\Delta=Z$
5	Замкнутая ветвь (петля) с проводимостью Y	
		$\Delta=1$
6	Схема-контур из сопротивлений	
		$\Delta=Z_1+Z_2+\dots+Z_n$
7	Схема - параллельное соединение проводимостей	
		$\Delta=Y_1+Y_2+\dots+Y_n$
8	Схема-контур из сопротивления Z и проводимости Y	
		$\Delta=ZY+1$
9	Разомкнутая ZY -ветвь	
		$\Delta=Y$
10	Простейшие схемы с неудаляемым управляемым источником (НУИ)	
		$\Delta = 1$ и $\Delta = -1$

Таблица П5

**Условия вырождения схемы и нейтрализации элементов
при замыкании и размыкании ветвей**

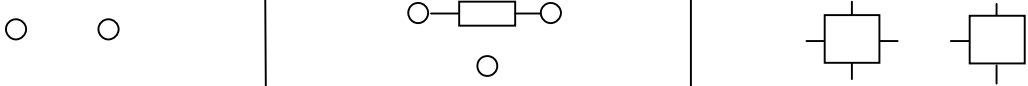




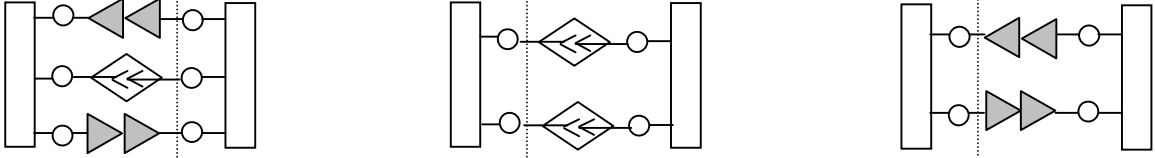
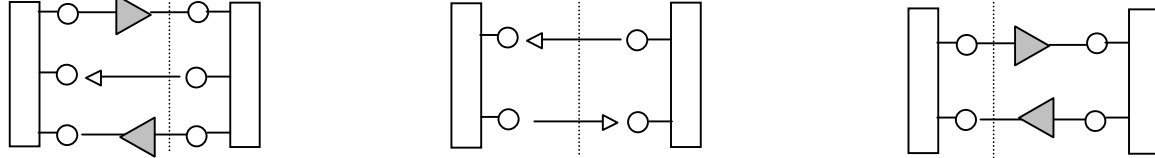
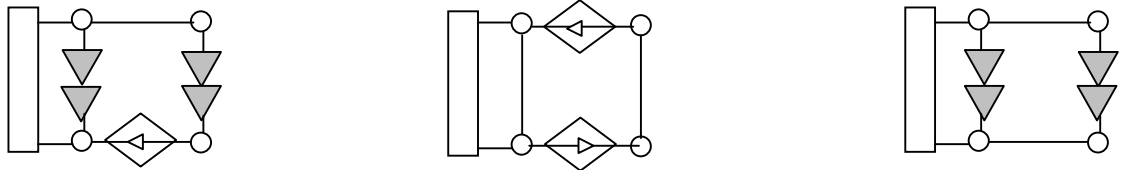
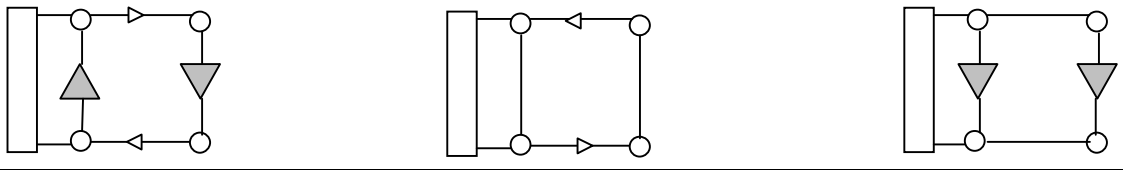
Элемент схемы	Петля	Висячая ветвь
у-ветвь	Нейтрализация	Выделение у
z-ветвь	Выделение z	Нейтрализация
Генератор E	Вырождение	Нейтрализация
Приемник I	Вырождение	Нейтрализация
Генератор J	Нейтрализация	Вырождение
Приемник U	Нейтрализация	Вырождение
Генератор НУИ	Вырождение	Вырождение
Приемник НУИ	Вырождение	Вырождение

Таблица П6

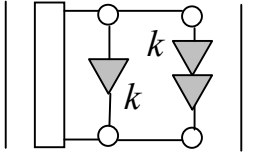
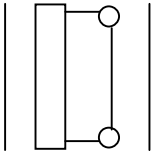
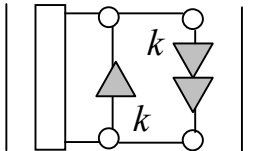
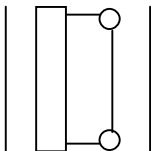
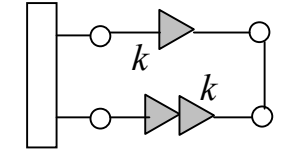
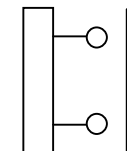
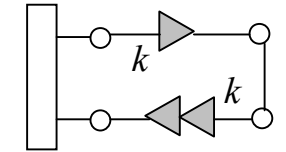
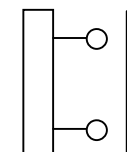
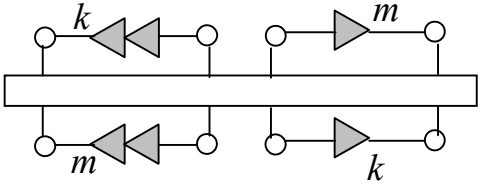
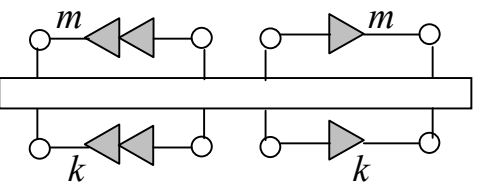
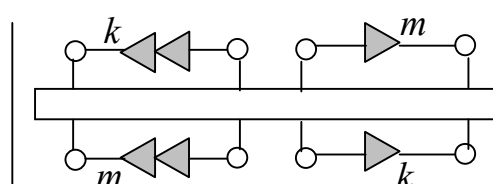
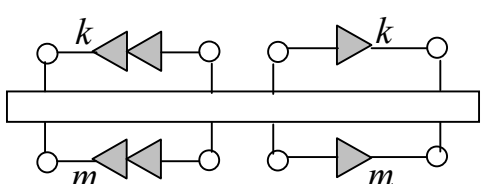
Следствия параллельного и последовательного соединения элементов

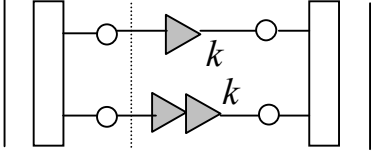
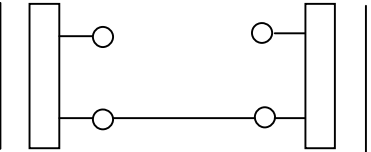
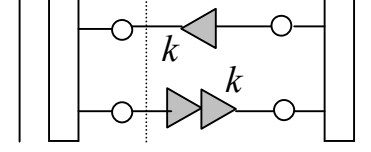
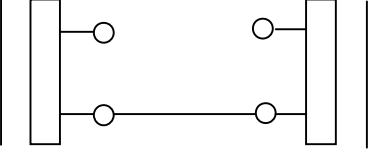
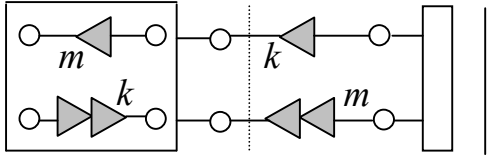
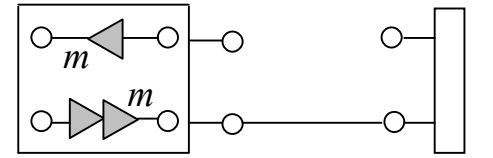
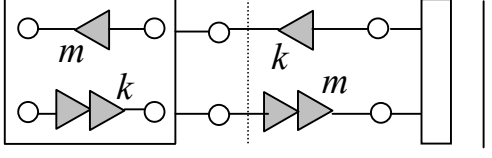
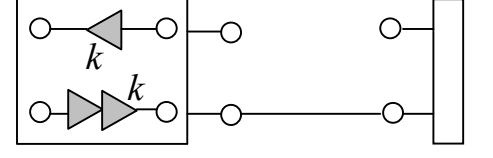
Элемент схемы	Соединение элемента			
	параллельное		Последовательное	
	с ГН или ГНУИ	с ПТ или ПНУИ	с ГТ или ГНУИ	с ПН или ПНУИ
Проводимость (у-ветвь)	Удаление		Стягивание-выделение	
Сопротивление (z-ветвь)	Удаление-выделение		Стягивание	
Генератор напряжения (ГН)	Вырождение	НУИ	Стягивание	
Приемник тока (ПТ)	НУИ	Вырождение		Стягивание
Генератор тока (ГТ)	Удаление		Вырождение	НУИ
Приемник напряжения (ПН)		Удаление	НУИ	Вырождение
Генератор НУИ (ГНУИ)	Вырождение		Вырождение	
Приемник НУИ (ПНУИ)		Вырождение		Вырождение

Таблица П7
Условия вырождения схем ($\Delta=0$)

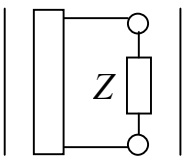
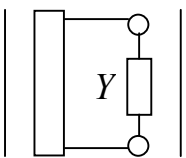
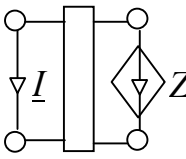
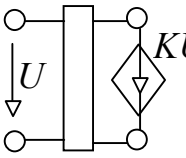
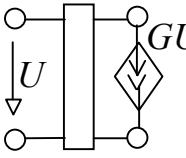
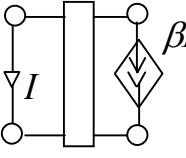
№	Классы схем
1	<p data-bbox="395 331 1273 365">Схемы, состоящие из двух и более несвязных подсхем</p> 
2	<p data-bbox="373 477 1294 510">Схемы с разомкнутым или замкнутым генератором НУИ</p> 
3	<p data-bbox="373 622 1294 656">Схемы с разомкнутым или замкнутым приемником НУИ</p> 
4	<p data-bbox="272 768 1393 801">Схемы с замкнутыми генератором напряжения или приемником тока</p> 
5	<p data-bbox="256 913 1409 947">Схемы с разомкнутыми генератором тока или приемником напряжения</p> 
6	<p data-bbox="312 1059 1353 1093">Схемы с сечением из генераторов тока и (или) генераторов НУИ</p> 
7	<p data-bbox="248 1317 1425 1350">Схемы с сечением из приемников напряжения и (или) приемников НУИ</p> 
8	<p data-bbox="248 1541 1425 1574">Схемы с контуром из генераторов напряжения и (или) генераторов НУИ</p> 
9	<p data-bbox="312 1776 1353 1809">Схемы с контуром из приемников тока и (или) приемников НУИ</p> 

Преобразование определителей схем с НУИ

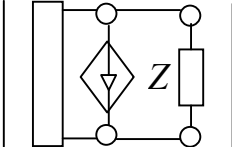
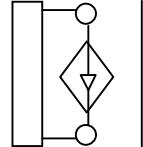
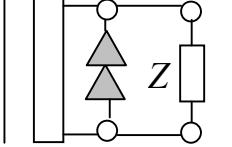
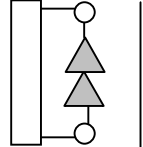
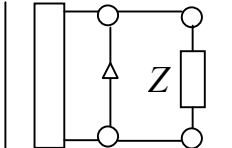
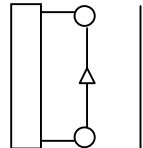
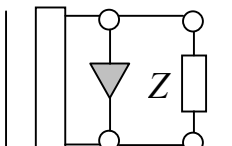
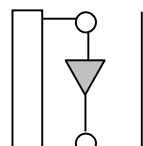
№	Исходное схемно-алгебраическое выражение	Эквивалентное схемно-алгебраическое выражение
1	2	3
1	Замещение проводником однонаправленного параллельного соединения генератора и приемника НУИ	
		
2	Замещение проводником противоположнонаправленного параллельного соединения генератора и приемника НУИ	
		
3	Исключение встречного последовательного соединения генератора и приемника НУИ	
		
4	Исключение согласного последовательного соединения генератора и приемника НУИ	
		
5	Взаимная замена номеров у генераторов НУИ	
		
6	Взаимная замена номеров у приемников НУИ	
		

1	2	3
7	Выделение НУИ, расположенного в сечении при согласной ориентации генератора и приемника	
		
8	Выделение НУИ, расположенного в сечении при встречной ориентации генератора и приемника	
		
9	Выделение НУИ, генератор которого находится вне сечения при согласной ориентации генератора и приемника разноименных НУИ	
		
10	Выделение НУИ, приемник которого находится вне сечения при согласной ориентации генератора и приемника разноименных НУИ	
11	Выделение НУИ, генератор которого находится вне сечения при встречной ориентации генератора и приемника разноименных НУИ	
12	Выделение НУИ, приемник которого находится вне сечения при встречной ориентации генератора и приемника разноименных НУИ	
		

Формулы выделения параметров базовых элементов

№	Исходное схемно-алгебраическое выражение	Эквивалентное схемно-алгебраическое выражение
1	Выделение параметра z -ветви	
		$Z * \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right + \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right $
2	Выделение параметра y -ветви	
		$Y * \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right + \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right $
3	Выделение параметра ИНУТ	
		$Z * \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right + \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right $
4	Выделение параметра ИНУН	
		$K * \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right + \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right $
5	Выделение параметра ИТУН	
		$G * \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right + \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right $
6	Выделение параметра ИТУТ	
		$\beta * \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right + \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right $

Частные случаи выделения параметров элементов

№	Исходное схемно-алгебраическое выражение	Эквивалентное схемно-алгебраическое выражение
1	2	3
1	Параллельное соединение z -ветви с генератором напряжения	
		Z^* 
2	Параллельное соединение z -ветви с генератором НУИ	
		Z^* 
3	Параллельное соединение z -ветви с приемником тока	
		Z^* 
4	Параллельное соединение z -ветви с приемником НУИ	
		Z^* 
5	Последовательное соединение y -ветви с генератором тока	
6	Последовательное соединение y -ветви с генератором НУИ	
7	Последовательное соединение y -ветви с приемником напряжения	

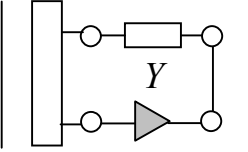
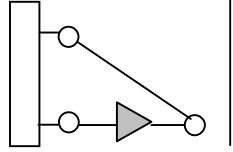
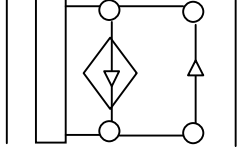
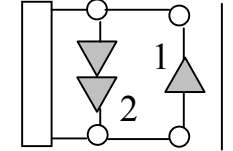
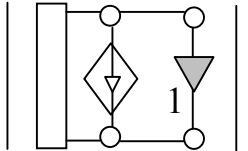
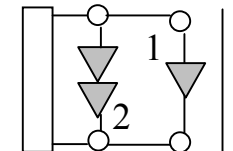
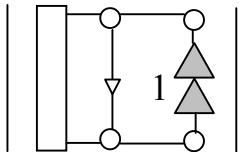
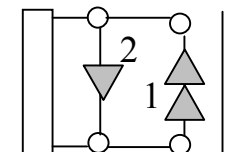
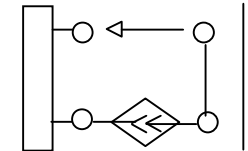
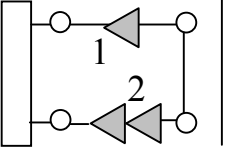
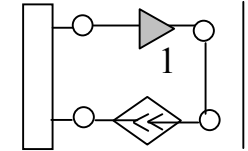
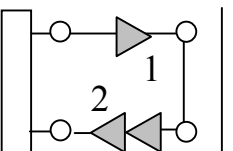
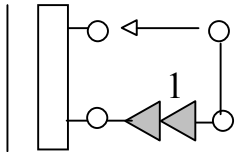
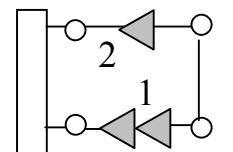
1	2	3
8	Последовательное соединение y -ветви с приемником НУИ	
		$Y *$ 
9	Параллельное соединение генератора напряжения УИ1 с параметром A и приемника тока УИ2 с параметром B	
		$A * B *$ 
10	Параллельное соединение генератора напряжения УИ2 с параметром A и приемника НУИ	
		$B *$ 
11	Параллельное соединение приемника тока УИ2 с параметром A и генератора НУИ	
		$A *$ 
12	Последовательное соединение приемника напряжения УИ1 с параметром A и генератора тока УИ2 с параметром B	
		$A * B *$ 
13	Последовательное соединение генератора тока УИ2 с параметром A и приемника НУИ	
		$A *$ 
14	Последовательное соединение приемника напряжения УИ2 с параметром A и генератора НУИ	
		$A *$ 

Таблица П11

Эквивалентные упрощения схем в результате нейтрализации элементов

№	Исходное САВ	Эквивалентное САВ
1	2	3
1	Удаление y -ветви, включенной параллельно генератору напряжения	
2	Удаление y -ветви, включенной параллельно генератору нули	
3	Удаление y -ветви, включенной параллельно приемнику тока	
4	Удаление y -ветви, включенной параллельно приемнику нули	
5	Стягивание z -ветви, включенной последовательно с генератором тока	
6	Стягивание z -ветви, включенной последовательно с генератором нули	
7	Стягивание z -ветви, последовательной приемнику напряжения	
8	Стягивание z -ветви, включенной последовательно с приемником нули	

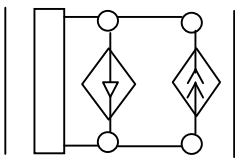
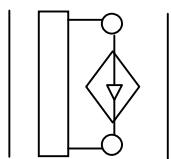
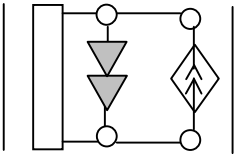
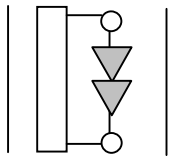
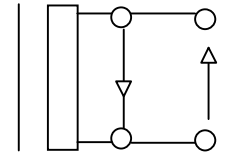
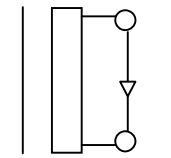
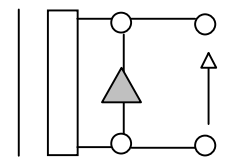
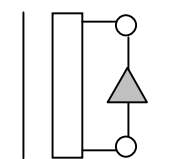


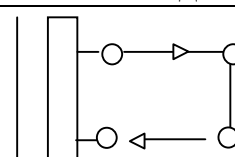
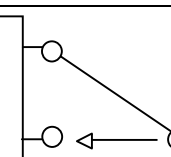
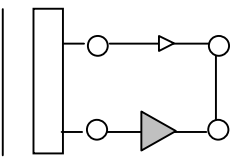
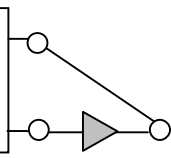


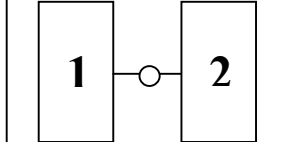
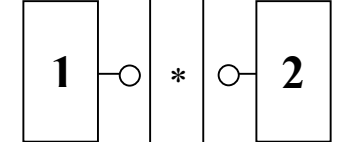
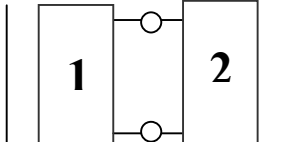
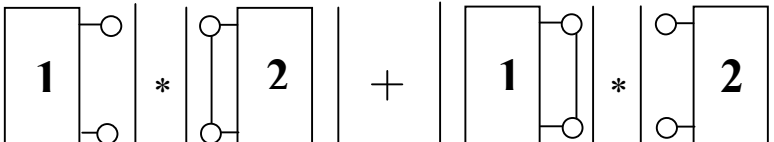
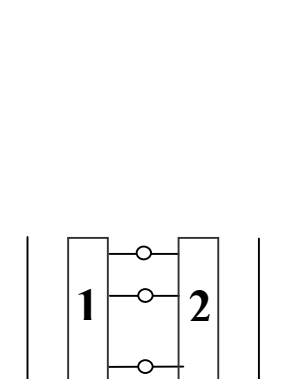
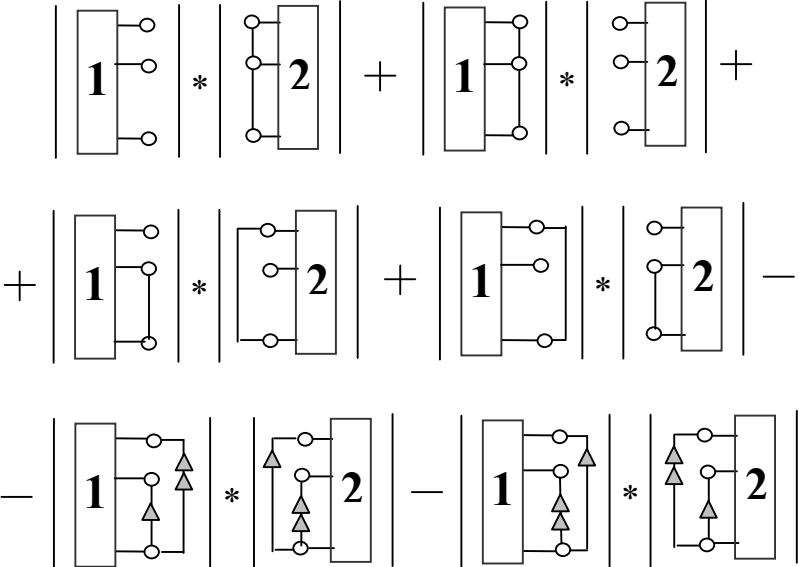
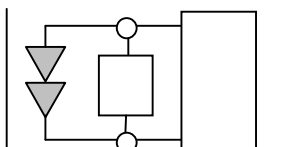
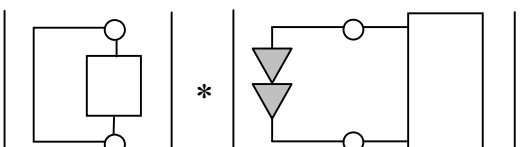
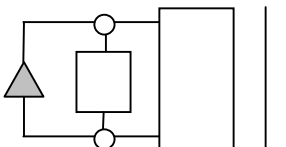
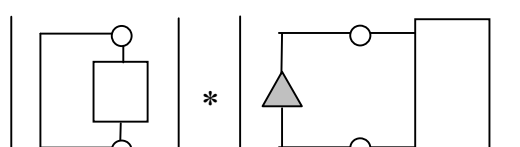
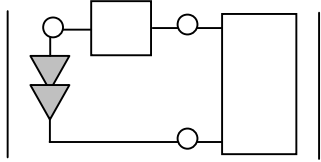
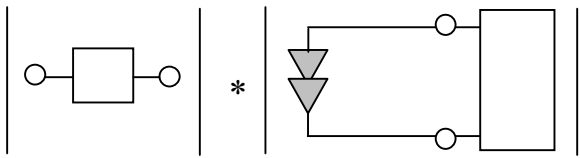
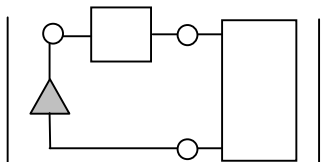
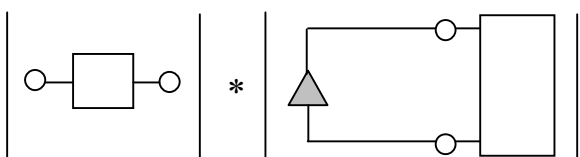
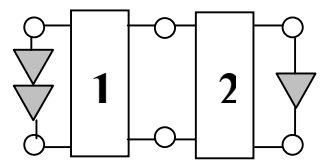
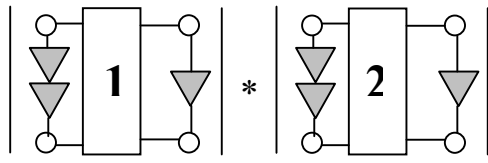
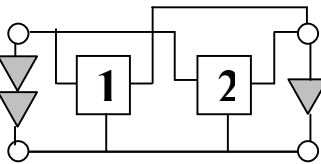
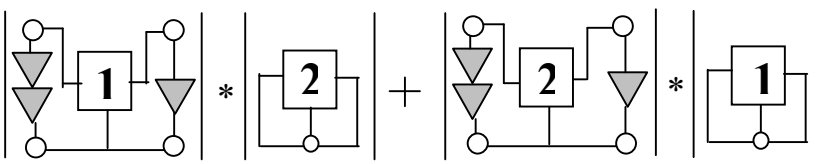
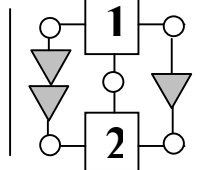
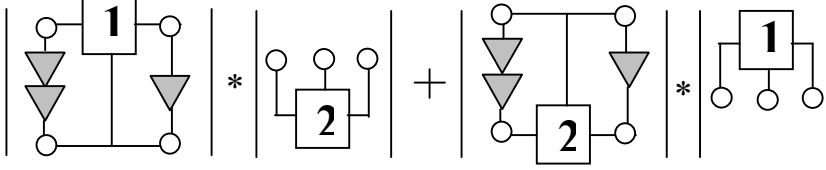
1	2	3
9	Параллельное соединение генератора тока с генератором напряжения	
		
10	Параллельное соединение генератора тока с генератором НУИ	
		
11	Параллельное соединение приемника напряжения с приемником тока	
		
12	Параллельное соединение приемника напряжения с приемником НУИ	
		
13	Последовательное соединение генератора напряжения и генератора тока	
		
14	Последовательное соединение генератора напряжения и генератора НУИ	
		
15	Последовательное соединение приемника тока с приемником напряжения	
		
16	Последовательное соединение приемника тока с приемником НУИ	
		

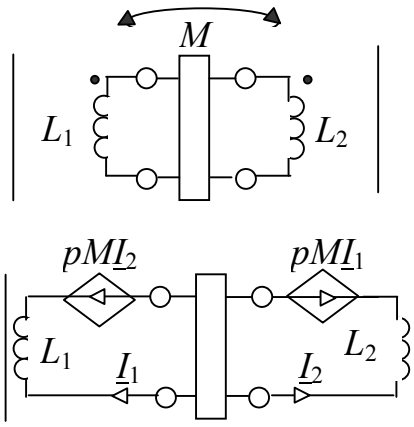
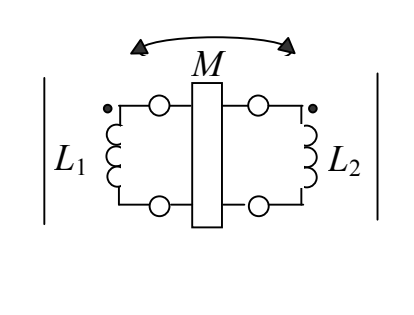
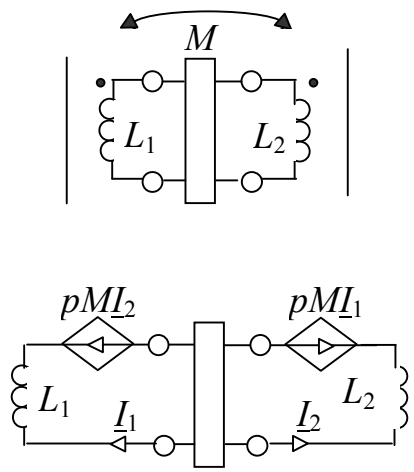
Таблица П12

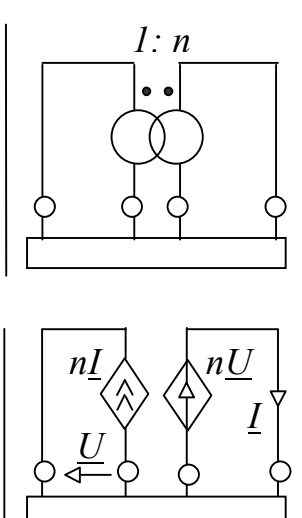
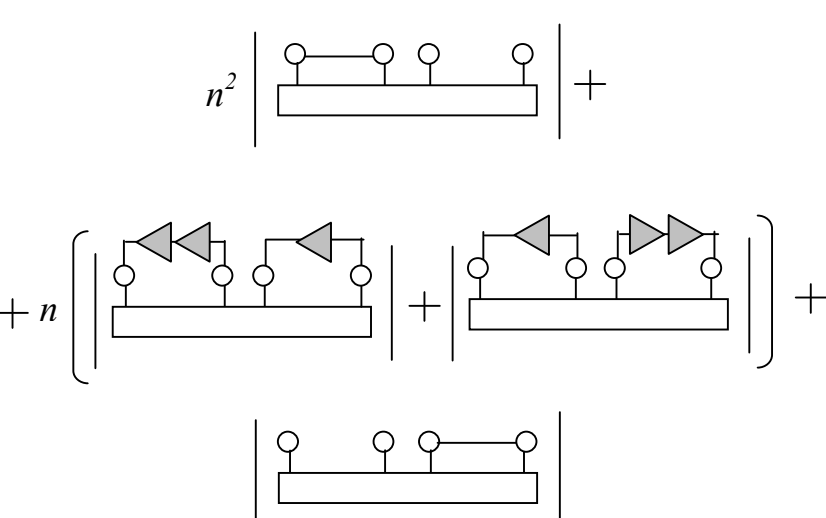
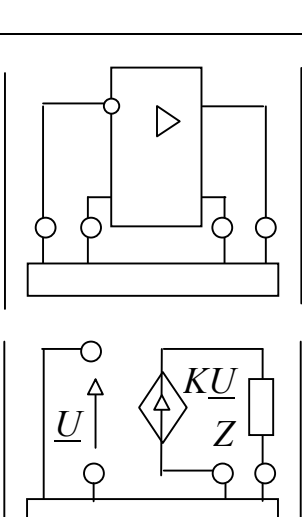
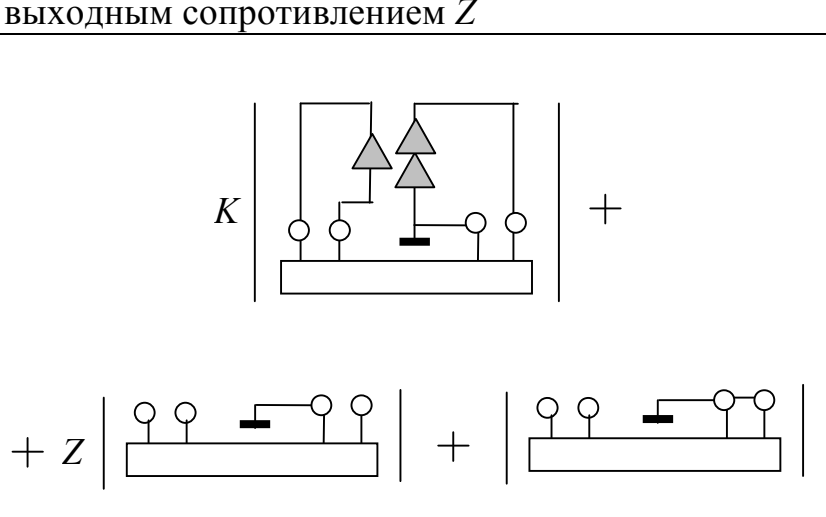
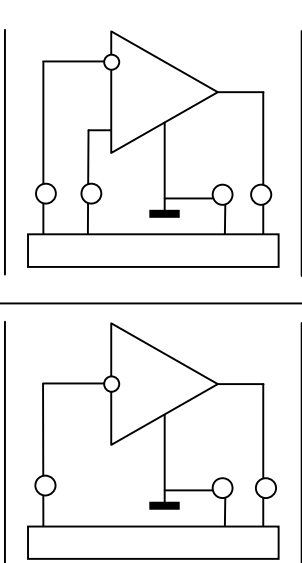
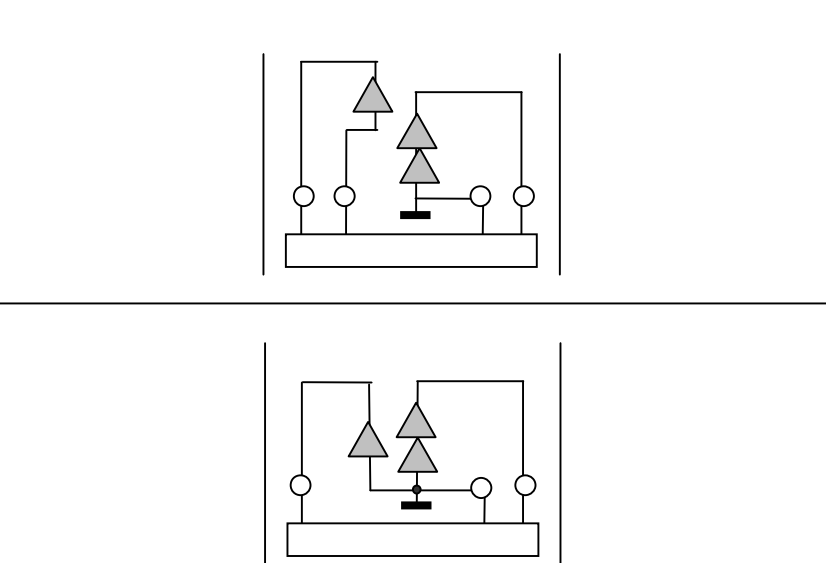
Разложение определителей схем делением их на части

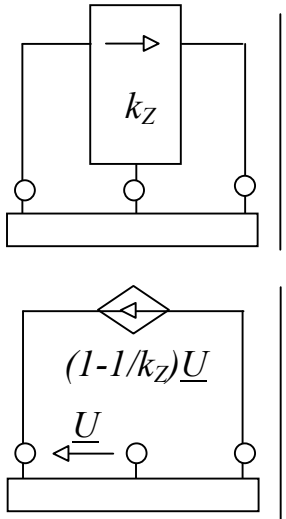
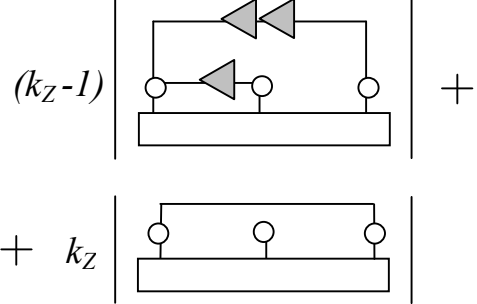
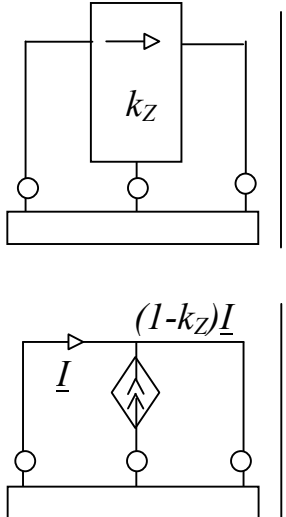
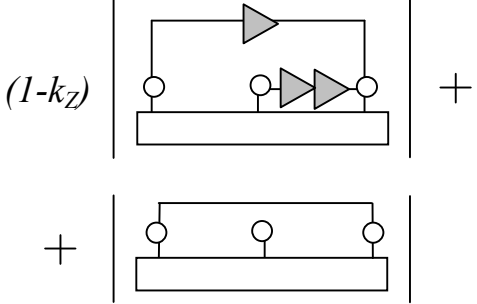
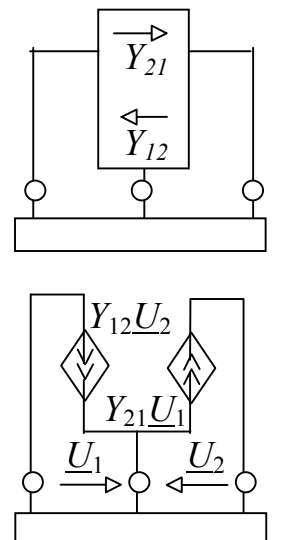
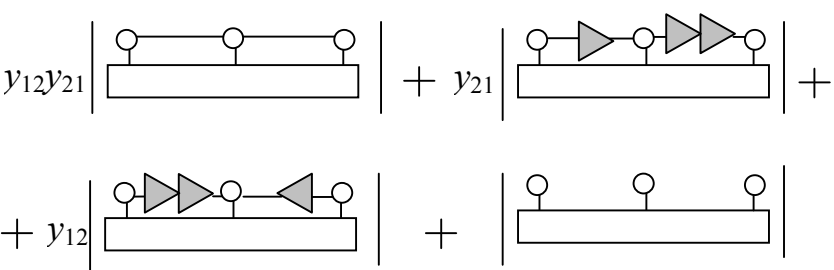
№	Исходное схемно-алгебраическое выражение	Эквивалентное схемно-алгебраическое выражение
1	2	3
1	Схема делится на две подсхемы по одному узлу	
		
2	Схема делится на две подсхемы по двум узлам	
		
3	Схема делится на две подсхемы по трем узлам	
		
4	Выделение двухполюсника, параллельного генератору НУИ	
		
5	Выделение двухполюсника, параллельного приемнику НУИ	
		

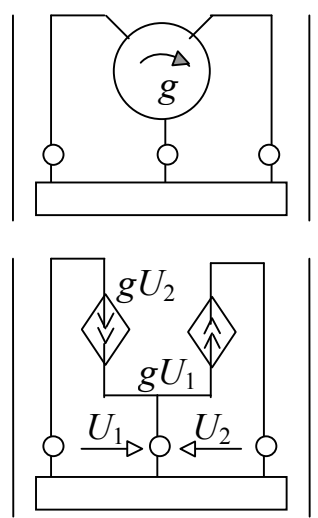
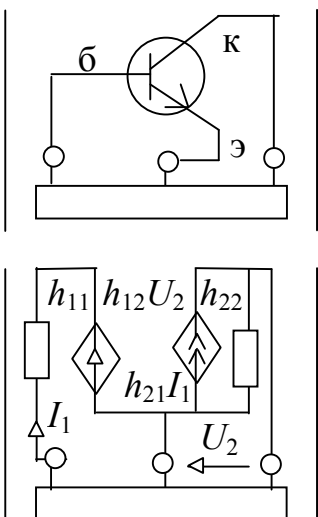
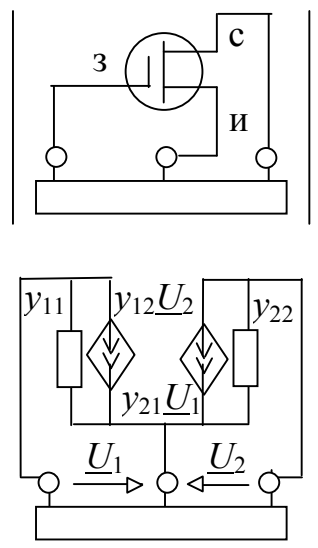
1	2	3
6	Выделение двухполюсника, соединенного последовательно с генератором НУИ	
		
7	Выделение двухполюсника, соединенного последовательно с приемником НУИ	
		
8	Нахождение числителя передаточной схемной функции при каскадном соединении двух четырехполюсников	
		
9	Нахождение числителя передаточной схемной функции при параллельном соединении двух трехполюсников	
		
10	Нахождение числителя передаточной схемной функции при последовательном соединении двух трехполюсников	
		

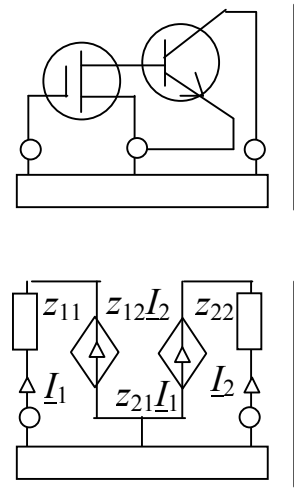
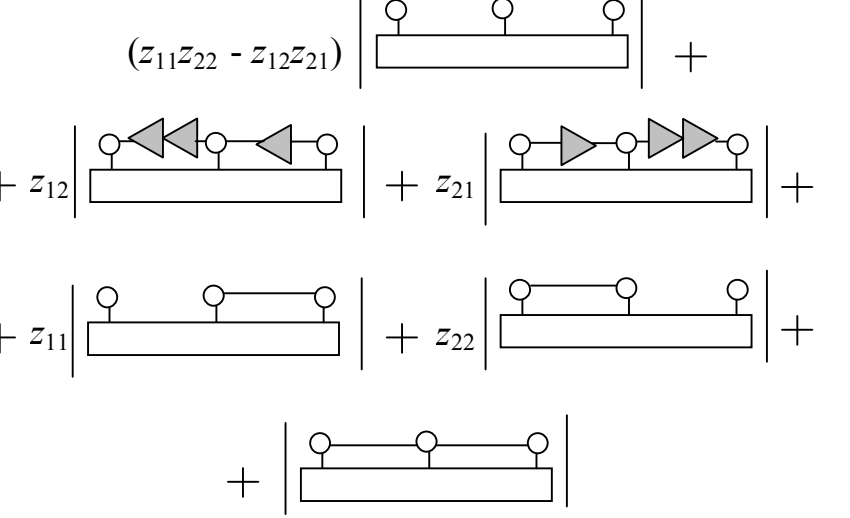
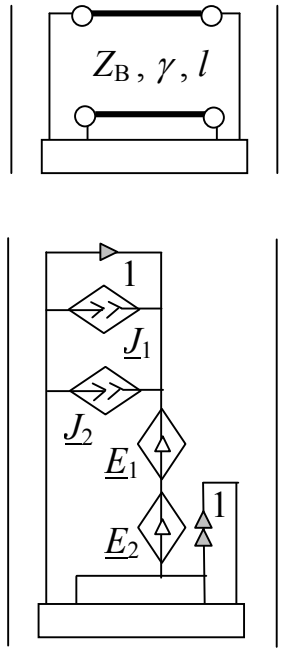
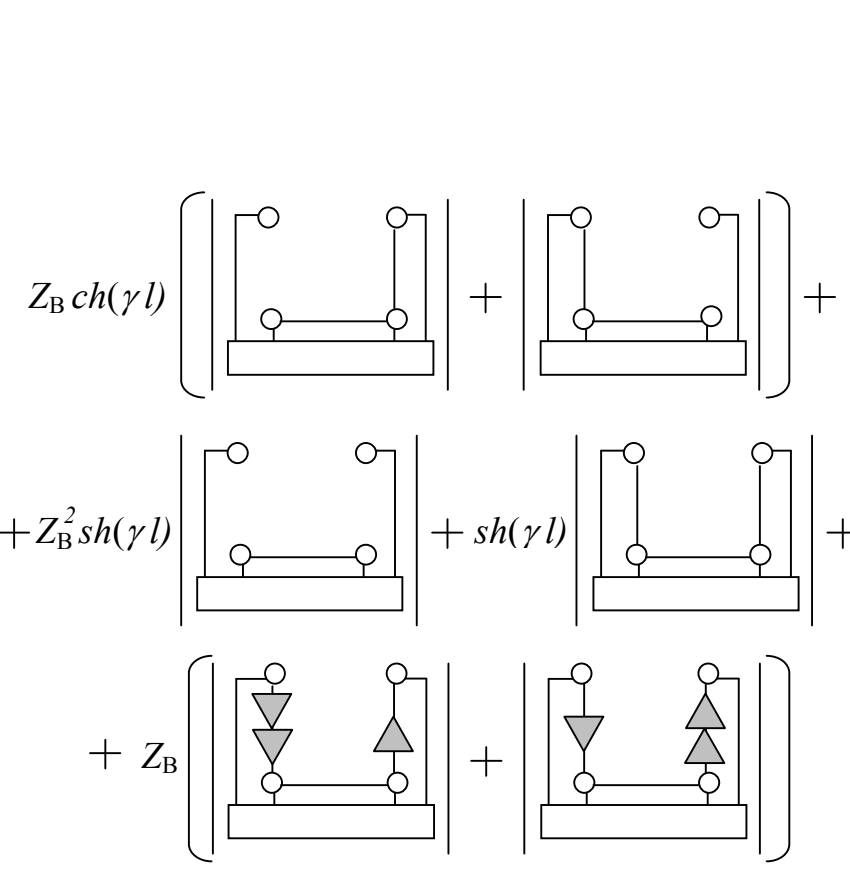
Дополнительные схемно-алгебраические формулы выделения параметров

№	Исходное схемно-алгебраическое выражение	Эквивалентное схемно-алгебраическое выражение
1	2	3
1	Выделение параметра индуктивно связанных катушек	
		$-p^2 M^2 \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \\ \text{---} \end{array} \right + pM \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \\ \text{---} \end{array} \right +$ $+ pM \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \\ \text{---} \end{array} \right + \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \\ \text{---} \end{array} \right $
2	Выделение параметра индуктивно связанных катушек во взаимной цепи	
		$-p^2 M^2 \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \\ \text{---} \end{array} \right + 2pM \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \\ \text{---} \end{array} \right +$ $+ \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \\ \text{---} \end{array} \right $
3	Выделение всех параметров двух взаимно связанных катушек	
		$(p^2(L_1L_2 - M^2)) \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \\ \text{---} \end{array} \right + \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \\ \text{---} \end{array} \right +$ $+ pM \left(\left \begin{array}{c} \text{---} \\ \\ \text{---} \end{array} \right + \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \\ \text{---} \end{array} \right \right) +$ $+ pL_1 \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \\ \text{---} \end{array} \right + pL_2 \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \\ \text{---} \end{array} \right $

1	2	3
4	<p style="text-align: center;"><i>l</i> : <i>n</i></p> 	<p style="text-align: center;">Идеальный трансформатор</p> 
5	<p style="text-align: center;">Операционный усилитель с конечным коэффициентом усиления <i>K</i> и выходным сопротивлением <i>Z</i></p> 	<p style="text-align: center;">Операционный усилитель с конечным коэффициентом усиления <i>K</i> и выходным сопротивлением <i>Z</i></p> 
6	<p style="text-align: center;">Идеальный операционный усилитель</p> 	<p style="text-align: center;">Идеальный операционный усилитель</p> 

1	2	3
7	<p data-bbox="268 203 1396 282" style="text-align: center;">Идеальный конвертор сопротивления с преобразованием напряжения (КСПН)</p> 	
8	<p data-bbox="268 844 1396 882" style="text-align: center;">Идеальный конвертор сопротивления с преобразованием тока (КСПТ)</p> 	
9	<p data-bbox="539 1449 1129 1487" style="text-align: center;">Идеальный инвертор сопротивления</p> 	

1	2	3
10		<p style="text-align: center;">Идеальный гиратор</p> $g^2 \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right + \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right +$ $+ g \left\{ \left \begin{array}{c} \text{---} \triangleright \triangleright \text{---} \triangleleft \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right + \left \begin{array}{c} \text{---} \triangleright \text{---} \triangleright \triangleright \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right \right\}$
11	<p style="text-align: center;">Низкочастотный биполярный транзистор с h-параметрами</p> 	$(h_{11}h_{22} - h_{12}h_{21}) \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right +$ $+ h_{12} \left \begin{array}{c} \text{---} \triangleleft \triangleleft \text{---} \triangleleft \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right + h_{21} \left \begin{array}{c} \text{---} \triangleright \text{---} \triangleright \triangleright \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right +$ $+ h_{11} \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right + h_{22} \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right +$ $+ \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right $
12	<p style="text-align: center;">Биполярный, полевой, составной транзистор с y-параметрами</p> 	$(y_{11}y_{22} - y_{12}y_{21}) \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right +$ $+ y_{12} \left \begin{array}{c} \text{---} \triangleright \triangleright \text{---} \triangleleft \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right + y_{21} \left \begin{array}{c} \text{---} \triangleright \text{---} \triangleleft \triangleleft \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right +$ $+ y_{11} \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right + y_{22} \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right +$ $+ \left \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right $

1	2	3
13	<p style="text-align: center;">Составной транзистор, представленный z-параметрами</p>  <p>The diagram shows a composite transistor circuit on the left and its equivalent circuit on the right. The equivalent circuit consists of a central dependent current source $(z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21})$ in parallel with four independent z-parameters: z_{12}, z_{21}, z_{11}, and z_{22}.</p>	<p style="text-align: center;">3</p>  <p>The equivalent circuit is shown as a sum of components in parallel: a dependent current source $(z_{11}z_{22} - z_{12}z_{21})$, and four independent z-parameters: z_{12}, z_{21}, z_{11}, and z_{22}.</p>
14	<p style="text-align: center;">Длинная (передающая) линия</p>  <p>The diagram shows a long transmission line on the left and its equivalent circuit on the right. The equivalent circuit includes a dependent current source $Z_B ch(\gamma l)$ and a dependent voltage source $Z_B^2 sh(\gamma l)$ in series with a dependent current source $sh(\gamma l)$. Below the diagram are the following equations:</p> $\underline{J}_1 = \frac{sh(\gamma l)}{Z_B} \cdot \underline{U}_2$ $\underline{J}_2 = ch(\gamma l) \cdot \underline{I}_2$ $\underline{E}_1 = ch(\gamma l) \cdot \underline{U}_2$ $\underline{E}_2 = Z_B sh(\gamma l) \cdot \underline{I}_2$	<p style="text-align: center;">Длинная (передающая) линия</p>  <p>The equivalent circuit is shown as a sum of components in parallel: a dependent current source $Z_B ch(\gamma l)$, a dependent voltage source $Z_B^2 sh(\gamma l)$ in series with a dependent current source $sh(\gamma l)$, and a dependent current source Z_B.</p>

Библиографический список

1. Теоретические основы электротехники: В 2 т. Т. 1: Основы теории линейных цепей / П.А.Ионкин, А.И.Даревский, Е.С.Кухаркин, В.Г.Миронов, Н.А.Мельников.– М.: Высшая школа, 1976.– 544 с.
2. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей: Линейные цепи.– М.: Высшая школа, 1990.– 400 с.
3. Попов В.П. Основы теории цепей.– М.: Высшая школа, 2000.– 575с.
4. Филаретов В.В. Топологический анализ электронных схем методом выделения параметров // Электричество.– 1998.– № 5.– С. 43-52.
5. Филаретов В.В. Анализ электрических цепей методом схемных определителей: Метод. указания к практическим занятиям по электротехнике и электронике.– Ульяновск: УлГТУ, 2001.– 40 с.
6. Очков В.Ф. MathCAD для студентов и инженеров.– М.: Компьютер Пресс, 1999.– 523 с.
7. Бугров Я.С., Никольский С.М. Дифференциальное и интегральное исчисление.– М.: Наука, 1981.– 448 с.

Учебное издание

**СХЕМНО-СИМВОЛЬНЫЙ И МАТРИЧНО-ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ
УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

Методические указания

СОСТАВИТЕЛИ:

Курганов Сергей Александрович
Филаретов Владимир Валентинович
Шеин Дмитрий Владимирович

Компьютерный набор В.В.Филаретов

Редактор Н.А.Евдокимова

Подписано в печать 05.11.2002. Формат 60x84/16

Бумага писчая. Усл. печ. л. 3,39. Уч.-изд. л. 3,36

Тираж 100 экз. Заказ 2413

Ульяновский государственный технический университет

432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32

Типография УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32