

Излагаются теория и основные алгоритмы специализированного математического обеспечения ЭВМ, предназначенного для моделирования переходных процессов в широком классе сложных электроэнергетических систем. Описывается конкретная реализация алгоритмов в виде математического обеспечения "РИТМ" для персональных ЭВМ и приводятся необходимые сведения о диалоговой системе общения пользователя с ЭВМ. Приводятся варианты заданий для курсовой работы и указания по ее исполнению.

Предназначено для студентов электротехнических специальностей. Пособие может быть полезно аспирантам и слушателям факультетов повышения квалификации преподавателей вузов и факультетов электротехнического профиля.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного технического университета.

© Санкт-Петербургский государственный
технический университет, 1995

ВВЕДЕНИЕ

Сложность и уникальность значительной части электроэнергетических объектов, а также повышенные требования к их надежности практически исключают системные исследования, выполняемые посредством проведения натуральных экспериментов. Сложность объектов ограничивает также возможность физического моделирования для изучения их свойств. В связи с этим математическое моделирование объектов электроэнергетики и изучение свойств их имитационных моделей является наиболее перспективным способом проведения необходимых исследований.

Имитационные модели, реализованные в виде отдельных программ, могут быть использованы для исследования переходных процессов, установившихся режимов, устойчивости и других свойств электроэнергетических объектов. Общим при решении различных задач анализа является то, что необходимо сформировать математическую модель объекта в виде системы соответствующих уравнений.

Разработка имитационной модели помимо получения системы соответствующих уравнений предполагает реализацию ряда алгоритмов: решения необходимых уравнений, воспроизведения законов регулирования и управления, имитации систем контроля, а также и регистрацию результатов. Таким образом, создание имитационной модели для исследования свойств конкретного объекта требует высокой и разносторонней квалификации разработчика и значительного времени.

Сокращение сроков выполнения исследований может быть обеспечено за счет применения специальных программных средств, автоматизирующих все этапы получения имитационной модели и результатов при минимальном объеме подготовительной работы. Применительно к цифровому моделированию переходных процессов в электроэнергетических системах одним из таких высокоавтоматизированных программных средств является вычислительный комплекс "РИТМ", построенный на базе универсальных алгоритмов формирования систем уравнений.

Получение практических навыков работы с вычислительным комплексом "РИТМ", а также изучение использованных в нем алгоритмов - цель курсовой работы, выполняемой студентами с помощью настоящего пособия.

Курсовая работа состоит из трех частей. В первой части следует для заданной расчетной схемы получить уравнения переходных процессов вручную по универсальным алгоритмам. Во второй части для этой же схемы уравнения должны быть получены на ЭВМ с помощью вычислительного комплекса "РИТМ". Третья часть курсовой работы предполагает моделирование переходного процесса при коротком замыкании в простейшей электрической системе.

Расчетная схема, для которой следует получить уравнения переходного процесса формализованным способом и с помощью ЭВМ, указывается преподавателем. Варианты схем приведены в прил. 1.

Переходный процесс, обусловленный возникновением трехфазного короткого замыкания, моделируется всеми студентами в электрической системе одного вида. Задания различаются только классом напряжения электрической системы. Варианты заданий приведены в прил. 2.

1. ПРОГРАММА КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Выполняются следующие этапы курсовой работы.

1. Получение уравнений описания переходных процессов в заданной электрической схеме по универсальным алгоритмам вручную.

2. Получение уравнений описания переходных процессов в заданной электрической схеме на ЭВМ.

3. Сопоставление уравнений переходного процесса, полученных при выполнении п. 1 и 2 этой программы.

4. Выполнение моделирования переходного процесса в электрической системе при возникновении короткого замыкания и получение графиков токов короткого замыкания.

5. Подготовка пояснительной записки, которая должна содержать:

- исходную заданную преподавателем электрическую схему, для которой были получены уравнения переходного процесса;
- исходные и конечные данные использованных алгоритмов, а также данные, иллюстрирующие работу этих алгоритмов;
- уравнения переходного процесса, полученные формализованным способом вручную с иллюстрацией способа получения уравнений каждой группы (для особых ветвей каждого имеющегося в

- задании типа, для дифференциальных уравнений и других);
- исходную электрическую схему, представленную в виде схемы соединения типовых блоков вычислительного комплекса с указанием их идентификации;
- цифровое описание структуры исходной электрической схемы для автоматизированного получения уравнений переходного процесса;
- листинг исходных данных и систему уравнений переходного процесса, полученные на ЭВМ;
- анализ сопоставления уравнений переходного процесса, полученных по формализованным алгоритмам вручную и на ЭВМ;
- схему электрической системы, для которой выполнено моделирование переходного процесса, графики токов короткого замыкания и их анализ.

2. ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ПОЛУЧЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

2.1. Общие положения

Формализованное получение уравнений переходного процесса предполагает выполнение следующих этапов:

- определение числа компонент связности орграфа и получение избыточного цифрового описания конфигурации расчетной схемы в виде совокупности структурных ориентированных чисел Λ_k ;
- цифровое описание структуры токов и напряжений ветвей в виде совокупности структурных ориентированных чисел $\Lambda_{ит}$;
- цифровое описание структуры токов и напряжений основных ветвей в виде совокупности структурных ориентированных чисел Λ_0 ;
- получение характеристик матрица структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы: базы B , кобазы B^* , описаний базисных циклов Λ и базисных циклов Θ ;
- указание множества неособых и особых ветвей базы и кобазы;
- формирование уравнений переходного процесса.

2.2. Цифровое описание расчетной схемы

элек
Е.Н.

Цифровое описание расчетной схемы должно содержать сведения о конфигурации расчетной схемы, типах ветвей, ее образующих, и числовые значения коэффициентов трансформации (токов) идеальных трансформаторов.

матем
пере
систе
матем
необх
Приво
испол

Конфигурация расчетной схемы описывается совокупностью структурных ориентированных чисел. Для ее получения необходимо выполнить следующие действия.

1. Идентифицировать ветви расчетной схемы. Для идентификации все элементарные двухполюсники расчетной схемы нумеруются в произвольном порядке непрерывным рядом целых чисел, начиная с единицы. Пара ветвей одного идеального трансформатора обязательно нумеруется соседними числами ряда.

Пособ.
повыш
электр

2. Задать условное положительное направление тока и падения напряжения для каждой двухполюсной ветви схемы. При задании условного положительного направления тока и падения напряжения любой ветви расчетной схемы необходимо учитывать следующее:

- направление для RLC-двухполюсников и ключей с двухсторонней проводимостью задается произвольно;

- направление для источника тока задается согласно с направлением тока источника;

- направление для источника э.д.с. задается противоположно направлению э.д.с. источника;

- направление для ключа с односторонней проводимостью определяется направлением возможного протекания в нём тока;

- положительные направления для токов ветвей с идентификаторами a_k и a_{k+1} одного и того же идеального трансформатора задаются согласованно со значением коэффициента трансформации $K_{a_k, a_{k+1}}$ этого же идеального трансформатора, причем так, чтобы выполнялось уравнение идеального трансформатора

$$i_{a_k} - K_{a_k, a_{k+1}} \cdot i_{a_{k+1}} = 0.$$

3. Получить граф расчетной схемы. Для получения графа каждому двухполюснику расчетной схемы следует поставить в соответствие ребро графа, каждому узлу - вершину графа. При этом под узлом расчетной

схемы понимается соединение двух и большего количества полюсов элементарных двухполюсников. Каждой ветви идеального трансформатора также ставится в соответствие ребро графа.

4. Получить ориентированный граф (оргграф) расчетной схемы. Для получения оргграфа всем ребрам графа следует придать направление.

5. Идентифицировать ребра оргграфа. Каждому ребру оргграфа присваивается номер соответствующей ветви расчетной схемы.

6. Получить цифровое описание каждой вершины оргграфа. Описанием некоторой вершины оргграфа является список номеров (со знаками) тех ребер, которые соединены с рассматриваемой вершиной. Если ребро направлено к вершине, то его номер в списке перечисляется со знаком "плюс", если от вершины - со знаком "минус". Такая последовательность номеров ребер со знаками соответствует цифровому описанию звезды оргграфа в виде структурного ориентированного числа λ .

7. Получить описание конфигурации расчетной схемы. Цифровым описанием конфигурации расчетной схемы является совокупность Λ_K , составленная из структурных ориентированных чисел λ , полученных для всех вершин оргграфа схемы.

Типы ветвей, образующих расчетную схему, задаются множествами Ψ_n , $n \in \{1, 2, \dots, 8\}$. Каждое множество Ψ_n должно содержать номера ребер оргграфа, соответствующих ветвям расчетной схемы одного типа. В множестве Ψ_1 перечисляются номера тех ребер, которые соответствуют замкнутым ключам (ЗК-тип), в множестве Ψ_2 - источникам э.д.с. (Е-тип), в множестве Ψ_3 - конденсаторам (С-тип), в множестве Ψ_4 - резисторам (R-тип), в множестве Ψ_5 - индуктивностям (L-тип), в множестве Ψ_6 - источникам тока (J-тип), в множестве Ψ_7 - разомкнутым ключам (РК-тип), в множестве Ψ_8 - идеальным трансформаторам.

Если расчетная схема не содержит ветвей какого-либо типа, то соответствующее множество является пустым. Пустое множество обозначается знаком $\{\emptyset\}$. Номера ребер оргграфа в множествах Ψ_n должны перечисляться в порядке возрастания.

Числовые значения коэффициента трансформации каждого идеального трансформатора определяются как указывалось выше - согласованно с условными положительными направлениями его ветвей.

2.3. Основные определения алгебры структурных ориентированных чисел

Определение 1. Структурным ориентированным числом λ называется объект

$$\lambda = \{\alpha_1^\lambda \alpha_2^\lambda \dots \alpha_s^\lambda\}.$$

Здесь α_r^λ ($r = 1, 2, \dots, s$) является элементом номер r структурного числа λ , причем

$$\alpha_r^\lambda = \text{sign } \alpha_r^\lambda \cdot K_r^\lambda \cdot u_r^\lambda.$$

где $\text{sign } \alpha_r^\lambda$ - функция, принимающая одно из двух возможных значений: +1 или -1; K_r^λ - коэффициент (числовой) элемента номер r структурного ориентированного числа λ , который может быть как положительным, так и отрицательным; u_r^λ - идентификатор элемента номер r структурного ориентированного числа λ .

Заметим, что точка между K_r^λ и u_r^λ является разделителем и не должна рассматриваться как знак умножения. Единичные коэффициенты K_r^λ обычно опускаются. Функция $\text{sign } \alpha_r^\lambda$ при записи элементов обычно учитывается только знаком "+" или "-" (без множителя 1).

Определение 2. Многочлен, полученный в результате замены идентификаторов структурного ориентированного числа значениями некоторых функций из заданного множества, поставленных им в соответствие, называется аналитической реализацией структурного ориентированного числа

$$\begin{aligned} A_W(\lambda) &= A_W(\{\alpha_1^\lambda \alpha_2^\lambda \dots \alpha_s^\lambda\}) = \\ &= A_W(\{\text{sign } \alpha_1^\lambda \cdot K_1^\lambda \cdot u_1^\lambda \text{ sign } \alpha_2^\lambda \cdot K_2^\lambda \cdot u_2^\lambda \dots \text{sign } \alpha_s^\lambda \cdot K_s^\lambda \cdot u_s^\lambda\}) = \\ &= \text{sign } \alpha_s^\lambda \cdot K_s^\lambda \cdot W_{u_s^\lambda} + \text{sign } \alpha_2^\lambda \cdot K_2^\lambda \cdot W_{u_2^\lambda} + \dots + \text{sign } \alpha_1^\lambda \cdot K_1^\lambda \cdot W_{u_1^\lambda}. \end{aligned}$$

где W - заданное множество значений некоторых функций.

Разделители (\cdot) в элементах структурного ориентированного числа рассматриваются в его аналитической реализации как знаки умножения.

аналитическая реализация структурного ориентированного числа $\{\emptyset\}$ равна нулю.

Определение 3. Произведением некоторого структурного ориентированного числа A и произвольного вещественного числа k называется структурное ориентированное число B , элементы которого определяются соотношениями

$$B = k \cdot A = k \cdot \{\alpha_1^A \alpha_2^A \dots \alpha_s^A\} = \{\alpha_1^B \alpha_2^B \dots \alpha_s^B\},$$

где $\text{sign } \alpha_r^B = \text{sign } \alpha_r^A$, $K_r^B = k \cdot K_r^A$, $u_r^B = u_r^A$, $r = 1, 2, \dots, s$,

$$\alpha_r^B = \text{sign } \alpha_r^B \cdot K_r^B \cdot u_r^B = \text{sign } \alpha_r^A \cdot k \cdot K_r^A \cdot u_r^A.$$

Определение 4. Суммой двух структурных ориентированных чисел A и B называется третье число C , составленное из всех элементов чисел A и B так, что каждая пара элементов

$$\alpha_m^A \quad (m \in \{1, 2, \dots, r\}) \quad \text{и} \quad \alpha_n^B \quad (n \in \{1, 2, \dots, s\})$$

с одинаковыми идентификаторами $u_m^A = u_n^B$ заменяется одним элементом α_q^C с тем же идентификатором $u_q^C = u_m^A = u_n^B$, знак $\text{sign } \alpha_q^C$ и коэффициент K_q^C которого определяются алгебраической суммой коэффициентов заменяемой пары с учетом знаков образующих ее элементов:

$$\text{sign } \alpha_q^C \cdot K_q^C = \text{sign } \alpha_m^A \cdot K_m^A + \text{sign } \alpha_n^B \cdot K_n^B, \quad u_q^C = u_m^A = u_n^B.$$

Умножение структурного ориентированного числа на произвольное вещественное число k и суммирование структурных ориентированных чисел являются линейными операциями, позволяющими получать линейные комбинации структурных ориентированных чисел. При этом вещественное число k является коэффициентом линейной комбинации.

Определение 5. Эквивалентным преобразованием совокупности структурных ориентированных чисел является замена любого числа совокупности на линейную комбинацию этого числа с ненулевым коэффициентом с любым другим числом этой совокупности.

элек
Е.Н.

Эквивалентные преобразования позволяют представить совокупность структурных ориентированных чисел так, что любой наперед заданный идентификатор будет содержаться не более чем в одном числе совокупности.

матем
пере:
систе
матем
необх
Привс
испол

Определение 6. Алгебраической производной некоторой совокупности структурных ориентированных чисел Λ , содержащей элемент с идентификатором α_k не более чем в одном числе совокупности, по идентификатору α_k называется совокупность структурных ориентированных чисел $\Lambda_{\{\alpha_k\}}$, которая отличается от Λ только при наличии в Λ числа, содержащего элемент с идентификатором α_k , и отличие заключается в том, что это число исключено.

Пособ
повыш
электр

Определение 7. Алгебраической обратной производной некоторой совокупности структурных ориентированных чисел Λ по идентификатору α_k называется совокупность структурных ориентированных чисел $\Lambda^{\{\alpha_k\}}$, которая получается из Λ путем вычеркивания всех элементов с идентификатором α_k во всех структурных ориентированных числах этой совокупности.

I
Санкт-

Вычисление алгебраической производной или алгебраической обратной производной совокупности структурных ориентированных чисел Λ по множеству, содержащему более одного идентификатора, производится последовательно по всем элементам множества, взятым в любом порядке. Алгебраическая производная и алгебраическая обратная производная по некоторому множеству Φ обозначаются соответственно Λ_Φ и Λ^Φ .

Определение 8. Пересечением $\lambda_A \cap \lambda_B$ двух структурных ориентированных чисел λ_A и λ_B называется структурное ориентированное число, каждый элемент которого образован соответствующей парой элементов пересекаемых чисел с одинаковым идентификатором, причем элемент пересечения имеет общий идентификатор пары со знаковой функцией и коэффициентом, определяемыми путем перемножения соответственно знаковых функций и коэффициентов элементов пары.

Определение 9. Единственный идентификатор базы в структурном ориентированном числе, описывающем базисный коцикл, а также единственный идентификатор кобазы в структурном ориентированном числе, которое соответствует базисному циклу, называется *определяющим*; ветвь, обозначенная определяющим идентификатором, называется *определяющей ветвью*.

2.4. Определение компонент орграфа и получение избыточного цифрового описания конфигурации расчетной схемы

Для получения избыточного цифрового описания конфигурации расчетной схемы необходимо из совокупности структурных ориентированных чисел Λ_k выделить те структурные ориентированные числа, которые являются описанием всех звезд каждой из компонент связности орграфа. Исключение из описания каждой компоненты орграфа по одному структурному ориентированному числу и последующее объединение полученных описаний компонент связности орграфа позволяет получить совокупность структурных ориентированных чисел, которая является избыточным цифровым описанием конфигурации расчетной схемы. Эта задача решается последовательным выполнением алгоритмов НС и КС (см. ниже).

Алгоритм определения непосредственных связей (алгоритм НС)

Исходные данные :

- Λ_k - совокупность из n структурных ориентированных чисел, описывающих все звезды орграфа с n вершинами.

Конечные данные :

- η_i , причем $i = 1, 2, \dots, n$, - последовательность списков порядковых номеров структурных ориентированных чисел исходной совокупности Λ_k с непосредственными связями.

Алгоритм

1. Выделить первое структурное ориентированное число λ из совокупности Λ_k .

2. Занести порядковый номер i числа λ в список η_i .

элемент
Е.Н.

3. Выделить идентификатор первого элемента из числа λ_t .

4. Среди остальных чисел совокупности $\Lambda_{\bar{k}}$, начиная с первого, установить такие, которые содержат элементы с выделенным идентификатором. Порядковые номера этих чисел занести в η_t , не допуская повторений.

матем
пере:
систе
матем
необх
Привс
испол

5. Повторить п. 4 для всех остальных идентификаторов структурного ориентированного числа λ , при этом будет получена последовательность η_t окончательного состава.

6. Выделить следующее структурное ориентированное число λ из совокупности $\Lambda_{\bar{k}}$ и перейти к выполнению п.2. Если такого числа нет, то искомая последовательность списков η_t определена и алгоритм выполнен.

Алгоритм определения компонент связности орграфа

(алгоритм КС)

Исходные данные :

- η_t ($t = 1, 2, \dots, n$) - последовательность списков порядковых номеров структурных ориентированных чисел исходной совокупности $\Lambda_{\bar{k}}$ с непосредственными связями.

Конечные данные :

- α_j ($j = 1, 2, \dots, k$) - последовательность списков порядковых номеров структурных ориентированных чисел исходной совокупности $\Lambda_{\bar{k}}$, описывающих все звезды каждой j -й компоненты орграфа.

Алгоритм:

1. Образовать из всех списков η_t ($t = 1, 2, \dots, n$) последовательность H из n списков. Присвоить начальное значение номеру компоненты связности : $j = 1$. Положить $\alpha_j = \{ \emptyset \}$.

2. Выделить первый список из последовательности H . Элементы этого списка занести в α_j , а сам выделенный список удалить из последовательности H .

3. Выделить второй элемент списка α_j .

4. Выделенный элемент обозначить a_m .

5. Среди оставшихся списков последовательности H найти тот, первый элемент которого совпадает с a_m . Дополнить α_j элементами этого списка, не допуская повторений, а сам список исключить из

последовательности H .

6. Если элемент a_m не является последним в списке α_j , то выделить следующий и перейти к выполнению п.4. В противном случае получен список α_j окончательного состава и следует перейти к выполнению п. 7.

7. Если в последовательности H нет списков, то перейти к выполнению п.8. В противном случае значение номера компоненты связности увеличить на единицу: $j = j + 1$; положить $\alpha_j = \{ \emptyset \}$ и перейти к выполнению п.2.

8. Алгоритм выполнен.

Каждый список α_j конечных данных алгоритма КС содержит порядковые номера структурных ориентированных чисел исходной совокупности $\Lambda_{\bar{k}}$, которые описывают все звезды j -й компоненты орграфа. Для получения избыточного цифрового описания j -й компоненты орграфа достаточно использовать укороченный список α_j , который может быть получен исключением любого одного его элемента, например последнего. Искомое избыточное цифровое описание орграфа расчетной схемы, обозначенное $\Lambda_{\bar{k}}$, представляет собой совокупность избыточных цифровых описаний всех его компонент.

2.5. Цифровое описание структуры токов и напряжений ветвей расчетной схемы

Цифровое описание расчетной схемы в виде совокупности структурных ориентированных чисел $\Lambda_{\bar{k}}$ аналогично описанию соотношениями между токами ветвей, полученными по первому закону Кирхгофа для простейших сечений расчетной схемы, отделяющих ее узлы. В том случае, если расчетная схема содержит идеальные трансформаторы, эти соотношения должны быть дополнены связями между токами ветвей каждого идеального трансформатора.

Соотношение между токами ветвей a_k и a_{k+1} идеального трансформатора описывается уравнением

$$i_{a_k} = K_{a_k, a_{k+1}} \cdot i_{a_{k+1}}$$

$$i_{a_k} - K_{a_k, a_{k+1}} \cdot i_{a_{k+1}} = 0.$$

или

Пособ
повыш
электр

1
Санкт-

Используя определение аналитической реализации структурного ориентированного числа, это уравнение можно представить в виде

$$A_i ([+a_k - K_{a_k, a_{k+1}} \cdot a_{k+1}]) = A (\lambda_{ит}) = 0 .$$

где

$$\lambda_{ит} = [+ a_k - K_{a_k, a_{k+1}} \cdot a_{k+1}] .$$

Следовательно, структурное ориентированное число $\lambda_{ит}$ является цифровым аналогом соотношения между токами ветвей идеального трансформатора.

Совокупность структурных ориентированных чисел $\lambda_{ит}$, дополненная числами $\lambda_{ит}$, составленными для каждого из идеальных трансформаторов схемы, является цифровой моделью структуры токов и напряжений ветвей расчетной схемы. Эту совокупность обозначим $\Lambda_{ит}$.

2.6. Цифровое описание структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы

Определение 10. Ветви расчетной схемы, соответствующие идеальным трансформаторам, называются *вспомогательными*, остальные ветви - *основными*.

Переход к цифровому описанию структуры токов и напряжений основных ветвей в виде совокупности Λ_0 связан с вычислением алгебраической производной совокупности структурных ориентированных чисел $\lambda_{ит}$ по множеству элементов Ψ_0 , содержащему номера ветвей идеальных трансформаторов расчетной схемы: $\Lambda_0 = \Lambda_{ит\Psi_0}$.

2.7. Алгоритмы получения характеристик матроида структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы

К подлежащим определению характеристикам матроида структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы, которые необходимы при формировании уравнений переходных процессов, относятся единственная база B , полученная с учетом приоритета ветвей, соответствующая ей кобаза B^* , совокупности базисных коциклов Λ и базисных циклов Θ . Эти характеристики могут быть получены в результате последовательного выполнения алгоритмов БКК и БЦ.

Исходные данные :

- Λ_0 - цифровая модель структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы;

- Ψ_n ($n = 1, 2, \dots, 7$) - подмножества, задающие типы основных ветвей расчетной схемы.

Конечные данные :

- B - множество идентификаторов ветвей базы;

- B^* - множество идентификаторов ветвей кобазы;

- Λ - полная совокупность структурных ориентированных чисел, описывающих базисные коциклы.

Алгоритм:

1. Копированием совокупности структурных ориентированных чисел Λ_0 получить совокупность $\Lambda_{тек}$.

2. Объединить множества Ψ_n в последовательности увеличения индекса n :

$$\Psi = \bigcup_{n=1}^7 \Psi_n .$$

3. Выделить первый элемент из множества Ψ .

4. Выделенный элемент обозначить a_k .

5. Если идентификатор a_k не содержится ни в одном структурном ориентированном числе совокупности $\Lambda_{тек}$, то перейти к выполнению п. 8. В противном случае с помощью эквивалентных преобразований обеспечить пребывание элемента с идентификатором a_k только в одном структурном ориентированном числе совокупности $\Lambda_{тек}$.

6. Структурное ориентированное число, содержащее элемент с идентификатором a_k , перевести в совокупность Λ и исключить из совокупности $\Lambda_{тек}$.

7. Занести идентификатор a_k в множество B и приступить к выполнению п. 9.

8. Занести идентификатор a_k в множество B^* .

9. Если a_k не является последним элементом множества Ψ , то выделить следующий элемент и перейти к выполнению п. 4. В противном случае получены B и B^* окончательного состава; перейти к выпол-

нению п. 10.

10. В каждом из структурных ориентированных чисел совокупности Λ , начиная с последнего, с помощью эквивалентных преобразований исключить все элементы с идентификаторами из множества B , кроме того, порядковый номер которого в B совпадает с порядковым номером рассматриваемого числа в совокупности Λ . Для исключения использовать только те структурные ориентированные числа совокупности Λ , порядковый номер которых больше порядкового номера рассматриваемого числа.

11. Частично упорядочить и преобразовать элементы каждого структурного ориентированного числа совокупности Λ : единственный элемент, содержащий идентификатор из базы B , разместить первым и с помощью эквивалентных преобразований обеспечить в нем знак минус и коэффициент 1.0. При этом получается Λ в окончательном виде и алгоритм выполнен.

Алгоритм построения базисных циклов (алгоритм БЦ)

Исходные данные :

- Λ - совокупность структурных ориентированных чисел, описывающих базисные кодиклы;
- B^* - множество идентификаторов ветвей кобазы.

Конечные данные :

- Θ - совокупность структурных ориентированных чисел, описывающих базисные циклы.

Алгоритм :

1. Выделить первый элемент из множества B^* .
2. Выделенный элемент обозначить a_s .
3. Копированием совокупности структурных ориентированных чисел Λ получить совокупность $\Lambda_{\text{тек}}$.
4. Образовать структурное ориентированное число θ_{a_s} , помещая на первое место элемент $-a_s$.
5. Выделить в совокупности $\Lambda_{\text{тек}}$ структурное ориентированное число λ , содержащее элемент с идентификатором a_s . Если такоу числа нет, то перейти к выполнению п.7.
6. Дополнить структурное ориентированное число θ_{a_s} элементом

знак которого противоположен знаку элемента с идентификатором a_s в выделенном числе, коэффициент равен коэффициенту u элемента с идентификатором a_s в выделенном числе, а идентификатор совпадает с определяющим идентификатором выделенного числа. Исключить выделенное число из совокупности $\Lambda_{\text{тек}}$ и перейти к выполнению п.5.

7. Включить структурное ориентированное число θ_{a_s} в совокупность Θ .

8. Если элемент a_s не является последним в множестве B^* , выделить следующий элемент и перейти к выполнению п.2. В противном случае получена совокупность Θ окончательного состава и алгоритм выполнен.

2.8. Неособые и особые ветви базы и кобазы

Перед формированием уравнений необходимо перечислить неособые и особые ветви базы и кобазы. Для указания неособых и особых ветвей следует иметь в виду следующие положения, которые могут рассматриваться как определение неособых и особых ветвей.

1. Все ветви базы ЗК-, Е- и С-типов являются неособыми ветвями базы. Множества таких ветвей обозначаются соответственно B_1^H , B_2^H и B_3^H .
2. Все ветви кобазы РК-, J-, и L-типов являются неособыми ветвями кобазы. Множества таких ветвей обозначаются B_7^{*H} , B_6^{*H} и B_5^{*H} .
3. Ветви базы R-типа, определяющие базисные кодиклы, которые не содержат ни одной ветви кобазы R-типа, являются неособыми ветвями базы. Множество таких ветвей обозначается B_4^H .
4. Ветви кобазы R-типа, определяющие базисные циклы, которые не содержат ни одной ветви базы R-типа, являются неособыми ветвями кобазы. Номера таких ветвей указываются в множестве B_4^{*H} .
5. Ветви базы, которые не принадлежат множествам B_1^H , B_2^H , B_3^H , B_4^H , называются особыми ветвями базы. Множества особых ветвей базы обозначаются B_4^O , B_5^O , B_6^O , B_7^O для ветвей базы R-, L-, J- и РК-типов соответственно.
6. Ветви кобазы, не принадлежащие множествам B_4^{*H} , B_5^{*H} , B_6^{*H} и B_7^{*H} , называются особыми ветвями кобазы. Множества особых ветвей кобазы обозначаются B_4^{*O} , B_3^{*O} , B_2^{*O} , B_1^{*O} для ветвей кобазы R-, C-, E- и ЗК-типов соответственно.

2.9. Формирование уравнений переходных процессов

Под расчетом переходного процесса понимается определение мгновенных значений токов и напряжений всех ветвей расчетной схемы. Решение указанной задачи предполагает определение токов и напряжений всех ветвей в текущий момент времени t и последующее определение переменных состояния в новый момент времени $t = t + \Delta t$, отстоящий от исходного на величину шага Δt . Принимая циклично новый момент времени за текущий, имеем возможность продолжать определение токов и напряжений всех основных ветвей расчетной схемы, изменяющихся во времени, и таким образом выполнить расчет переходного процесса. В соответствии с этим описание переходных процессов образуют алгебраические уравнения, обеспечивающие определение токов и напряжений ветвей в текущий момент времени, и дифференциальные уравнения, позволяющие их интегрированием получать токи и напряжения, являющиеся переменными состояния схемы, в новые моменты времени. При решении задач на ЭВМ интегрирование дифференциальных уравнений производится численными методами с шагом интегрирования Δt .

Задача вычисления токов и напряжений основных ветвей в текущий момент времени может быть разделена на две последовательные подзадачи:

- определение напряжений ветвей базы и токов ветвей кобазы;
- нахождение токов ветвей базы и напряжений ветвей кобазы.

В соответствии с этим алгебраические уравнения описания переходного процесса содержат две группы уравнений, обеспечивающих решение указанных подзадач.

2.9.1. Формирование уравнений для определения напряжений ветвей базы и токов ветвей кобазы

Общий вид уравнений для определения напряжений особых и неособых ветвей базы каждого из возможных типов приведен в табл. 2.1. Уравнения для определения токов особых и неособых ветвей кобазы возможных типов представлены в табл. 2.2. В этих уравнениях α и γ - относительные проводимости разомкнутых ключей и источников тока, β и ρ - относительные сопротивления замкнутых ключей и источников э.д.с., $G = 1/L$, $D = 1/C$.

Тип ветви	Вид уравнения
$\alpha_k \in B_1^H$	$u_{\alpha_k} = 0$
$\alpha_k \in B_2^H$	$u_{\alpha_k} = E_{\alpha_k}(t)$
$\alpha_k \in B_3^H$	$u_{\alpha_k} = u_{\alpha_k}(t)$
$\alpha_k \in B_4^H$	$u_{\alpha_k} = R_{\alpha_k} A_t \left(\lambda_{\alpha_k} u_{\alpha_k} \right)$
$\alpha_k \in B_4^O$	$\sum_{\alpha_s \in B_4^O} A_{\alpha_s} \left(\lambda_{\alpha_k} \cap \lambda_{\alpha_s} \right) u_{\alpha_s} = A_{W_4} \left(\lambda_{\alpha_k} u_{\alpha_k} \right)$ $W_{\alpha_m}^4 = \begin{cases} G_{\alpha_m} \left(\theta_{\alpha_m} u_{\alpha_m} \right); & \alpha_m \in \Phi_4 \\ I_{\alpha_m} & ; \alpha_m \notin \Phi_4 \end{cases}$
$\alpha_k \in B_5^O$	$\sum_{\alpha_s \in B_5^O} A_{\alpha_s} \left(\lambda_{\alpha_k} \cap \lambda_{\alpha_s} \right) u_{\alpha_s} = A_{W_5} \left(\lambda_{\alpha_k} u_{\alpha_k} \right)$ $W_{\alpha_m}^5 = \begin{cases} G_{\alpha_m} A_{\alpha_m} \left(\theta_{\alpha_m} u_{\alpha_m} \right); & \alpha_m \in \Phi_5 \\ \frac{dI_{\alpha_m}}{dt} & ; \alpha_m \notin \Phi_5 \end{cases}$

Тип ветви	Вид уравнения
$\alpha_k \in B_6^0$	$\sum_{\alpha_s \in B_6^0} A_{\gamma} \left(\lambda_{\alpha_k}^{\Psi \setminus \Psi_6} \cap \lambda_{\alpha_s}^{\Psi \setminus \Psi_6} \right) u_{\alpha_s} = A_{W6} \left(\lambda_{\alpha_k}^{\alpha_k} \cup \Psi_7 \right)$ $W_{\alpha_m}^6 = \gamma_{\alpha_m} \cdot A_{\alpha} \left(\theta_{\alpha_m}^{\alpha_m} \cup B_6^0 \cup \Psi_1 \right), \quad \alpha_m \in \Psi_6$
$\alpha_k \in B_7^0$	$\sum_{\alpha_s \in B_7^0} A_{\alpha} \left(\lambda_{\alpha_k} \cap \lambda_{\alpha_s} \right) u_{\alpha_s} = A_{W7} \left(\lambda_{\alpha_k}^{\alpha_k} \right)$ $W_{\alpha_m}^7 = \alpha_{\alpha_m} \cdot A_{\alpha} \left(\theta_{\alpha_m}^{\alpha_m} \cup B_7^0 \cup \Psi_1 \right), \quad \alpha_m \in \Psi_7$

Таблица 2.2

Определение токов ветвей кобазы

Тип ветви	Вид уравнения
$\alpha_k \in B_1^{*0}$	$\sum_{\alpha_s \in B_1^{*0}} A_{\beta} \left(\theta_{\alpha_k} \cap \theta_{\alpha_s} \right) i_{\alpha_s} = A_{W1} \left(\theta_{\alpha_k}^{\alpha_k} \right)$ $W_{\alpha_m}^1 = \beta_{\alpha_m} \cdot A_{\beta} \left(\lambda_{\alpha_m}^{\alpha_m} \cup B_1^{*0} \cup \Psi_7 \right), \quad \alpha_m \in \Psi_1$
$\alpha_k \in B_2^{*0}$	$\sum_{\alpha_s \in B_2^{*0}} A_{\rho} \left(\theta_{\alpha_k}^{\Psi \setminus \Psi_2} \cap \theta_{\alpha_s}^{\Psi \setminus \Psi_2} \right) i_{\alpha_s} = A_{W2} \left(\theta_{\alpha_k}^{\alpha_k} \cup \Psi_1 \right)$ $W_{\alpha_m}^2 = \rho_{\alpha_m} \cdot A_{\rho} \left(\lambda_{\alpha_m}^{\alpha_m} \cup B_2^{*0} \cup \Psi_7 \right), \quad \alpha_m \in \Psi_2$

Тип ветви	Вид уравнения
$\alpha_k \in B_3^{*0}$	$\sum_{\alpha_s \in B_3^{*0}} A_D \left(\theta_{\alpha_k}^{\Psi \setminus \Psi_3} \cap \theta_{\alpha_s}^{\Psi \setminus \Psi_3} \right) i_{\alpha_s} = A_{W3} \left(\theta_{\alpha_k}^{\alpha_k} \cup \Psi_1 \right)$ $W_{\alpha_m}^3 = \begin{cases} D_{\alpha_m} \cdot A_{\delta} \left(\lambda_{\alpha_m}^{\alpha_m} \cup B_3^{*0} \cup \Psi_7 \right); & \alpha_m \in \Psi_3 \\ \frac{di_{\alpha_m}}{dt} & ; \alpha_m \notin \Psi_3 \end{cases}$
$\alpha_k \in B_4^{*0}$	$\sum_{\alpha_s \in B_4^{*0}} A_R \left(\theta_{\alpha_k}^{\Psi \setminus \Psi_4} \cap \theta_{\alpha_s}^{\Psi \setminus \Psi_4} \right) i_{\alpha_s} = A_{W4} \left(\theta_{\alpha_k}^{\alpha_k} \cup \Psi_1 \right)$ $W_{\alpha_m}^4 = \begin{cases} R_{\alpha_m} \cdot A_{\delta} \left(\lambda_{\alpha_m}^{\alpha_m} \cup B_4^{*0} \cup \Psi_7 \right); & \alpha_m \in \Psi_4 \\ u_{\alpha_m} & ; \alpha_m \notin \Psi_4 \end{cases}$
$\alpha_k \in B_4^{*H}$	$i_{\alpha_k} = G_{\alpha_k} \cdot A_{\alpha} \left(\theta_{\alpha_k}^{\alpha_k} \cup \Psi_1 \right)$
$\alpha_k \in B_5^{*H}$	$i_{\alpha_k} = i_{\alpha_k}(t)$
$\alpha_k \in B_6^{*H}$	$\dot{i}_{\alpha_k} = J_{\alpha_k}(t)$
$\alpha_k \in B_7^{*H}$	$i_{\alpha_k} = 0$

Формирование уравнений целесообразно проводить в очередности, соответствующей их использованию при необходимости получения решения. В первую очередь следует формировать уравнения для определения напряжений всех неособых ветвей базы и токов всех неособых ветвей кобазы, продвигаясь при этом по приоритетному ряду типов ветвей в направлении "от краев к середине", т.е. получить уравнения для ветвей, идентификаторы которых содержатся в множествах $B_1^H, B_7^{*H}, B_2^H, B_6^{*H}, B_3^H, B_5^{*H}, B_4^H, B_4^{*H}$.

Напряжения особых ветвей базы и токи особых ветвей кобазы R -типа могут быть вычислены путем решения соответствующих систем алгебраических уравнений. Однако более предпочтительным является способ, когда формируется и решается одна из возможных систем, а именно та, порядок которой меньше, а вместо формирования другой системы большего порядка используются простейшие алгебраические уравнения, применяемые для неособых ветвей этого же типа.

Порядок каждой системы уравнений определяется числом элементов множеств B_4^O и B_4^{*O} .

Если число элементов множества B_4^O не больше числа элементов множества B_4^{*O} , то следует формировать систему уравнений для определения напряжений особых ветвей базы R -типа. После формирования такой системы уравнений токи особых ветвей кобазы R -типа могут быть определены из решения уравнений, вид которых совпадает с видом уравнений для определения токов неособых ветвей кобазы R -типа.

В том случае, если число элементов множества B_4^{*O} меньше числа элементов множества B_4^O , то следует формировать систему уравнений для определения токов особых ветвей кобазы R -типа. После этого напряжения особых ветвей базы R -типа могут быть определены из уравнений, вид которых совпадает с видом уравнений для определения напряжений неособых ветвей базы R -типа.

Далее формируются системы алгебраических уравнений для определения напряжений остальных особых ветвей базы и токов остальных ветвей кобазы. Эти системы уравнений должны формироваться последовательно для элементов множеств $B_5^O, B_3^O, B_6^O, B_2^O, B_7^O, B_1^O$, то есть по принципу продвижения по приоритетному ряду типов ветвей "от середины к краям".

2.9.2. Формирование уравнений для определения токов ветвей базы и напряжений ветвей кобазы

Уравнения для определения токов всех ветвей базы и напряжений всех ветвей кобазы являются алгебраическими и имеют вид:

$$i_{a_k} = A_i (\lambda_{a_k}^{(a_k)} \cup \Psi_7), \quad a_k \in B;$$

$$u_{a_k} = A_u (\theta_{a_k}^{(a_k)} \cup \Psi_1), \quad a_k \in B^*.$$

2.9.3. Формирование дифференциальных уравнений

Дифференциальные уравнения формируются для всех переменных состояния. Переменными состояниями являются напряжения ветвей базы C -типа и токи ветвей кобазы L -типа. Уравнения имеют следующий общий вид:

$$\frac{d u_{a_k}}{dt} = D_{a_k} \cdot A_i (\lambda_{a_k}^{(a_k)} \cup \Psi_7), \quad a_k \in B \cap \Psi_3;$$

$$\frac{d i_{a_k}}{dt} = \Gamma_{a_k} \cdot A_u (\theta_{a_k}^{(a_k)} \cup \Psi_1), \quad a_k \in B^* \cap \Psi_5,$$

где $D_{a_k} = I / C_{a_k}$, $\Gamma_{a_k} = I / L_{a_k}$.

2.10. Пример формализованного получения уравнений переходного процесса

В качестве примера получим уравнения переходного процесса для расчетной схемы, приведенной на рис. 2.1, а. Для рассматриваемой схемы проведена идентификация ветвей и заданы положительные направления токов и напряжений.

Уравнения переходного процесса получим, выполняя последовательно этапы, указанные в п. 2.1.

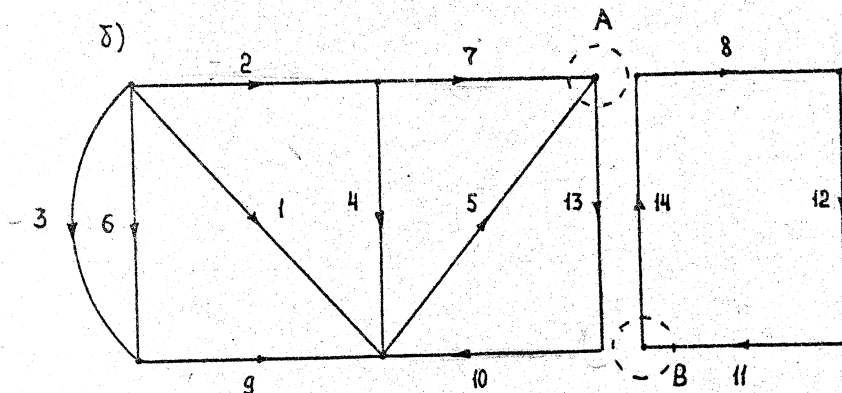
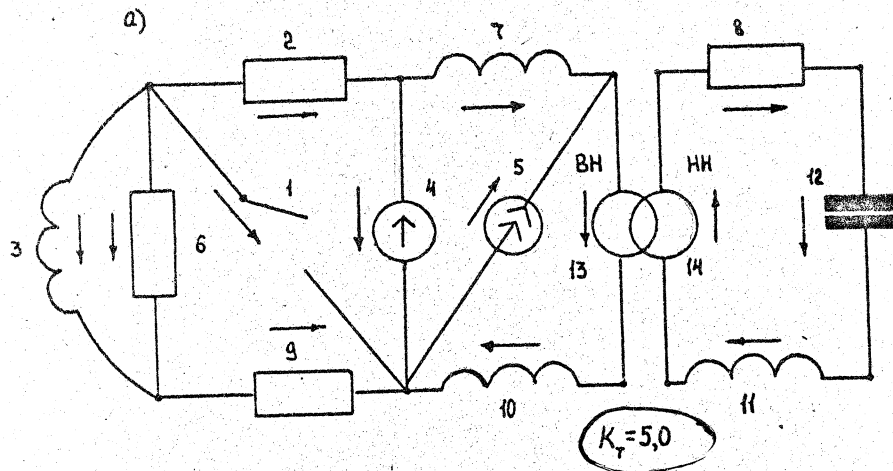


Рис. 2.1. Расчетная схема электрической цепи (а)
и ее оргграф (б)

2.10.1. Цифровое описание расчетной схемы

Оргграф расчетной схемы, полученный в соответствии с рекомендациями п. 2.2, приведен на рис. 2.1, б.

Структурное ориентированное число λ_A , описывающее вершину А оргграфа, имеет вид

$$\lambda_A = [+7 +5 -13].$$

Для вершины В оргграфа имеем

$$\lambda_B = [-14 +11].$$

Объединяя цифровые описания вершин оргграфа в совокупность структурных ориентированных чисел Λ_K , получаем:

$$\Lambda_K = [+7 +5 -13] [-14 +11] [+14 -8] [-3 -6 -2 -1] \\ [+2 -4 -7] [+8 -12] [+12 -11] [+3 +6 -9] \\ [+9 +1 +4 -5 +10] [+13 -10].$$

Совокупность структурных ориентированных чисел Λ_K является цифровым описанием конфигурации расчетной схемы.

Продолжая цифровое описание заданной схемы, укажем типы ветвей. Для этого перечислим номера ребер оргграфа в соответствующих множествах:

$$\Psi_1 = \{ \emptyset \}, \Psi_2 = \{ 4 \}, \Psi_3 = \{ 12 \}, \Psi_4 = \{ 2, 6, 8, 9 \}, \\ \Psi_5 = \{ 3, 7, 10, 11 \}, \Psi_6 = \{ 5 \}, \Psi_7 = \{ 1 \}, \Psi_8 = \{ 13, 14 \}.$$

Специально следует подчеркнуть, что для обеспечения совпадения уравнений, получаемых вручную, с уравнениями, выдаваемыми ЭВМ, номера ребер оргграфа в множествах Ψ_n ($n \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$) должны быть перечислены в порядке возрастания.

Числовое значение коэффициента трансформации K_T обычно определяется как отношение модулей напряжений обмоток сторон высокого U_B и низкого U_H напряжения трансформатора. Этот коэффициент трансформации имеет обратное значение по отношению к требуемому для дальнейшего использования в процедурах формирования уравнений коэффициента трансформации токов $K = K_{13,14}$ тех же ветвей. С учетом

использованной нумерации ветвей расчетной схемы, выбранных направлений и заданного значения коэффициента трансформации K_T имеем:

$$K_T = K_{13,14}^{-1} = K^{-1} = \frac{|U_{ВН}|}{|U_{НН}|} = \frac{|U_{13}|}{|U_{14}|} = 5.0.$$

При таком значении коэффициента трансформации идеального трансформатора справедливо соотношение между токами образующих его двухполюсников

$$i_{13} - K_{13,14} \cdot i_{14} = 0$$

или

$$i_{13} - K \cdot i_{14} = 0.$$

Следовательно, в исходных данных, представляющих собою цифровое описание расчетной схемы, должен быть задан коэффициент трансформации идеального трансформатора $K = 0,2$.

2.10.2. Определение компонент орграфа и получение избыточного цифрового описания конфигурации расчетной схемы

Избыточное цифровое описание конфигурации расчетной схемы может быть получено по конечным данным последовательного выполнения алгоритмов НС и КС.

Определение непосредственных связей (алгоритм НС)

Исходные данные :

$$\Lambda_{\bar{K}} = \begin{bmatrix} +7 & +5 & -13 \\ +2 & -4 & -7 \\ +9 & +1 & +4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -14 & +11 \\ +8 & -12 \\ +13 & -10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +14 & -8 \\ +12 & -11 \\ +13 & -10 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 & -6 & -2 & -1 \\ +3 & +6 & -9 \\ +13 & -10 \end{bmatrix}$$

Выделим первое структурное ориентированное число из совокупности $\Lambda_{\bar{K}}$: $\lambda = [+7 +5 -13]$. Порядковый номер числа занесем в список η_1 : $\eta_1 = \{ 1 \}$. Первый элемент числа λ имеет идентификатор $u_1^\lambda = 7$. Поскольку элемент с этим идентификатором содержит только структурное ориентированное число с порядковым номером 5, то $\eta_1 = \{ 1, 5 \}$. Второй элемент числа λ имеет идентификатор 5. Этот же идентификатор входит только в элемент числа с порядковым номером 9 исходной совокупности $\Lambda_{\bar{K}}$, поэтому $\eta_1 = \{ 1, 5, 9 \}$. Последний элемент числа λ имеет идентификатор $u_3^\lambda = 13$. Элемент с идентификатором 13 содержится

десятым структурным числе совокупности $\Lambda_{\bar{K}}$. С учетом этого

$$\eta_1 = \{ 1, 5, 9, 10 \}.$$

Выполнение последующих циклов алгоритма дает :

$$\begin{aligned} \eta_2 &= \{ 2, 3, 7 \}, & \eta_3 &= \{ 3, 2, 6 \}, \\ \eta_4 &= \{ 4, 8, 5, 9 \}, & \eta_5 &= \{ 5, 4, 9, 1 \}, \\ \eta_6 &= \{ 6, 3, 7 \}, & \eta_7 &= \{ 7, 6, 2 \}, \\ \eta_8 &= \{ 8, 4, 9 \}, & \eta_9 &= \{ 9, 8, 4, 5, 1, 10 \}, \\ \eta_{10} &= \{ 10, 1, 9 \}. \end{aligned}$$

Определение числа компонент связности орграфа (алгоритм КС)

Исходные данные :

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \{ 1, 5, 9, 10 \}, & \eta_2 &= \{ 2, 3, 7 \}, \\ \eta_3 &= \{ 3, 2, 6 \}, & \eta_4 &= \{ 4, 8, 5, 9 \}, \\ \eta_5 &= \{ 5, 4, 9, 1 \}, & \eta_6 &= \{ 6, 3, 7 \}, \\ \eta_7 &= \{ 7, 6, 2 \}, & \eta_8 &= \{ 8, 4, 9 \}, \\ \eta_9 &= \{ 9, 8, 4, 5, 1, 10 \}, & \eta_{10} &= \{ 10, 1, 9 \}. \end{aligned}$$

Образуем из списков η_i ($i = 1, 2, \dots, 10$) последовательность H : $\{ 1, 5, 9, 10 \}, \{ 2, 3, 7 \}, \{ 3, 2, 6 \}, \{ 4, 8, 5, 9 \}, \{ 5, 4, 9, 1 \}, \{ 6, 3, 7 \}, \{ 7, 6, 2 \}, \{ 8, 4, 9 \}, \{ 9, 8, 4, 5, 1, 10 \}, \{ 10, 1, 9 \}$.

Для первой компоненты орграфа первоначально имеем: $j = 1$, $x_j = \{ \emptyset \}$. После выделения первого списка $\eta_1 = \{ 1, 5, 9, 10 \}$ получим $x_1 = \{ 1, 5, 9, 10 \}$,

H : $\{ 2, 3, 7 \}, \{ 3, 2, 6 \}, \{ 4, 8, 5, 9 \}, \{ 5, 4, 9, 1 \}, \{ 6, 3, 7 \}, \{ 7, 6, 2 \}, \{ 8, 4, 9 \}, \{ 9, 8, 4, 5, 1, 10 \}, \{ 10, 1, 9 \}$.

Вторым элементом списка x_1 является элемент $a_m = 5$. Установим в последовательности H список, первый элемент которого совпадает с a_m . Таким списком является список $\{ 5, 4, 9, 1 \}$. Выполняя п. 5 алгоритма, получаем :

$$x_1 = (1, 5, 9, 10, 4),$$

$$H : \{ 2, 3, 7 \}, \{ 3, 2, 6 \}, \{ 4, 8, 5, 9 \}, \{ 6, 3, 7 \}, \{ 7, 6, 2 \}, \\ \{ 8, 4, 9 \}, \{ 9, 8, 4, 5, 1, 10 \}, \{ 10, 1, 9 \}.$$

Выполняя п. 4 - 6 алгоритма для всех элементов дополняемого списка x_1 , получаем:

$$x_1 = (1, 5, 9, 10, 4, 8),$$

$$H : \{ 2, 3, 7 \}, \{ 3, 2, 6 \}, \{ 6, 3, 7 \}, \{ 7, 6, 2 \}.$$

Последовательность H содержит еще четыре списка, поэтому $j = 2$, $x_2 = (\emptyset)$, и следует перейти к выполнению п. 2 алгоритма:

$$\eta = \{ 2, 3, 7 \},$$

$$x_2 = \{ 2, 3, 7 \},$$

$$H : \{ 3, 2, 6 \}, \{ 6, 3, 7 \}, \{ 7, 6, 2 \}.$$

Выполняя п. 3 - 6 алгоритма, получаем, что

$$x_2 = \{ 2, 3, 7, 6 \}$$

и последовательность H не содержит ни одного списка.

Конечные данные:

$$j = 2, x_1 = (1, 5, 9, 10, 4, 8), x_2 = (2, 3, 7, 6).$$

Таким образом, оргграф расчетной схемы имеет две компоненты, которые описываются структурными ориентированными числами совокупности Λ_K с порядковыми номерами соответственно 1, 5, 9, 10, 4, 8 и 2, 3, 7, 6.

Исключив из каждого списка последние элементы, получим неизбыточное цифровое описание оргграфа расчетной схемы в виде совокупности структурных ориентированных чисел Λ_K , образованной из структурных ориентированных чисел совокупности Λ_K , порядковые номера которых образуют укороченные списки x_1 и x_2 :

$$\Lambda_K = \begin{bmatrix} +7 & +5 & -13 \\ +13 & -10 \\ +12 & -11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +2 & -4 & -7 \\ -3 & -6 & -2 & -1 \\ -14 & +11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +9 & +1 & +4 & -5 & +10 \\ +14 & -8 \\ +12 & -11 \end{bmatrix}$$

3.10.3. Получение цифрового описания структуры токов и напряжений ветвей расчетной схемы

Расчетная схема, приведенная на рис. 2.1, а, содержит один идеальный трансформатор. В связи с этим цифровое описание соотношений между токами ветвей в виде совокупности структурных ориентированных чисел Λ_K должно быть дополнено цифровым описанием соотношения между токами ветвей идеального трансформатора.

Получим это цифровое описание.

Для рассматриваемой расчетной схемы выше, в конце п. 2.10.1, было получено уравнение идеального трансформатора и значение коэффициента трансформации $K = 0,2$:

$$i_{13} - K i_{14} = 0.$$

С использованием определения аналитической реализации структурного ориентированного числа это уравнение может быть представлено в виде

$$i_{13} - K \cdot i_{14} = A_i (\lambda_{HT}) = 0,$$

где

$$\lambda_{HT} = \begin{bmatrix} +13 & -K \cdot 14 \end{bmatrix}.$$

Подставив числовое значение коэффициента, окончательно получим:

$$\lambda_{HT} = \begin{bmatrix} +13 & -0,2 \cdot 14 \end{bmatrix}.$$

Преобразуем для удобства это структурное ориентированное число в равное ему так, чтобы в нем был целочисленный коэффициент:

$$\lambda_{HT} = \begin{bmatrix} +14 & -5 \cdot 0,13 \end{bmatrix}.$$

Заметим, что такое преобразование не является обязательным.

Таким образом, цифровое описание структуры токов и напряжений ветвей расчетной схемы является совокупностью структурных ориентированных чисел Λ_{HT} :

$$\Lambda_{HT} = \begin{bmatrix} +7 & +5 & -13 \\ +13 & -10 \\ -3 & -6 & -2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +2 & -4 & -7 \\ -14 & +11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +9 & +1 & +4 & -5 & +10 \\ +14 & -8 \\ +12 & -11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +13 & -10 \\ +14 & -5 \cdot 0,13 \end{bmatrix}.$$

2.10.4. Получение цифрового описания структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы

Цифровым описанием структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы является совокупность Λ_0 , получаемая преобразованием совокупности структурных ориентированных чисел $\Lambda_{ит}$:

$$\Lambda_0 = \Lambda_{ит\Phi_8}$$

матем
пере:
систе
матем
необх
Привс
испол

Пособ
повыш
электр

Санкт-

Для рассматриваемой схемы $\Phi_8 = (13, 14)$. Вычислим алгебраическую производную совокупности $\Lambda_{ит}$ по первому элементу множества Φ_8 : $\alpha_k = 13$. Поскольку идентификатор $\alpha_k = 13$ входит в состав элементов трех структурных ориентированных чисел совокупности $\Lambda_{ит}$, то с помощью эквивалентных преобразований (см. п. 3.2) обеспечим присутствие элемента с идентификатором $\alpha_k = 13$ только в одном числе совокупности $\Lambda_{ит}$. Для этого четвертое число совокупности заменим на линейную комбинацию этого числа с первым числом совокупности:

$$[+13 \ -10] = [+13 \ -10] + [+7 \ +5 \ -13] = [+13 \ -10 \ +7 \ +5 \ -13] = [-10 \ +7 \ +5]$$

После преобразования имеем:

$$\Lambda_{ит} = [+7 \ +5 \ -13] [+2 \ -4 \ -7] [+9 \ +1 \ +4 \ -5 \ +10] [-10 \ +7 \ +5] [-3 \ -6 \ -2 \ -1] [-14 \ +11] [+14 \ -8] [+12 \ -11] [+14 \ -5.0.7 \ -5.0.5]$$

В состав преобразованной совокупности входят лишь два числа содержащие элементы с идентификатором $\alpha_k = 13$. Продолжим эквивалентные преобразования, заменяя девятое число совокупности на линейную комбинацию этого числа с первым числом, умноженным на коэффициент -5.0 :

$$\begin{aligned} [+14 \ -5.0.13] &= [+14 \ -5.0.13] + (-5.0) \cdot [+7 \ +5 \ -13] = \\ &= [+14 \ -5.0.13] + [-5.0.7 \ -5.0.5 \ +5.0.13] = \\ &= [+14 \ -5.0.13 \ -5.0.7 \ -5.0.5 \ +5.0.13] = \\ &= [+14 \ -5.0.7 \ -5.0.5] \end{aligned}$$

С учетом этого совокупность $\Lambda_{ит}$ примет вид:

$$\Lambda_{ит} = [+7 \ +5 \ -13] [+2 \ -4 \ -7] [+9 \ +1 \ +4 \ -5 \ +10] [-10 \ +7 \ +5] [-3 \ -6 \ -2 \ -1] [-14 \ +11] [+14 \ -8] [+12 \ -11] [+14 \ -5.0.7 \ -5.0.5]$$

Преобразованная совокупность $\Lambda_{ит}$ содержит единственное число с идентификатором $\alpha_k = 13$, поэтому далее получим:

$$\Lambda_{ит(13)} = [+2 \ -4 \ -7] [+9 \ +1 \ +4 \ -5 \ +10] [-10 \ +7 \ +5] [-3 \ -6 \ -2 \ -1] [-14 \ +11] [+14 \ -8] [+12 \ -11] [+14 \ -5.0.7 \ -5.0.5]$$

Следующий элемент множества Φ_8 имеет идентификатор $\alpha_k = 14$. Идентификатор $\alpha_k = 14$ также входит в состав трех структурных ориентированных чисел совокупности $\Lambda_{ит(13)}$. После аналогичного применения эквивалентных преобразований имеем:

$$\Lambda_{ит(13)} = [+2 \ -4 \ -7] [+9 \ +1 \ +4 \ -5 \ +10] [-10 \ +7 \ +5] [-3 \ -6 \ -2 \ -1] [-14 \ +11] [+11 \ -8] [+12 \ -11] [+11 \ -5.0.7 \ -5.0.5]$$

Вычислив алгебраическую производную совокупности $\Lambda_{ит(13)}$ по последнему идентификатору $\alpha_k = 14$ из множества Φ_8 , получим совокупность Λ_0 :

$$\Lambda_0 = [+2 \ -4 \ -7] [+9 \ +1 \ +4 \ -5 \ +10] [-10 \ +7 \ +5] [-3 \ -6 \ -2 \ -1] [+11 \ -8] [+12 \ -11] [+11 \ -5.0.7 \ -5.0.5]$$

которая является цифровым описанием структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы.

2.10.5. Получение характеристик матрицы структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы

Для формирования уравнений необходимы база, кобаза и совокупности структурных ориентированных чисел, описывающих базисные коциклы и базисные циклы. Эти характеристики получают по алгоритмам БКК и БЦ.

Построение базы, кобазы и базисных коциклов (алгоритм БКК)

Исходные данные:

$$\Lambda_0 = [+2 \ -4 \ -7] [+9 \ +1 \ +4 \ -5 \ +10] [-10 \ +7 \ +5] [-3 \ -6 \ -2 \ -1] [+11 \ -8] [+12 \ -11] [+11 \ -5.0.7 \ -5.0.5]$$

$$\Phi_1 = (\emptyset), \Phi_2 = (4), \Phi_3 = (12), \Phi_4 = (2, 6, 8, 9), \Phi_5 = (3, 7, 10, 11), \Phi_6 = (5), \Phi_7 = (1)$$

Копируя совокупность структурных ориентированных чисел Λ_0 и объединяя множества Φ_n в порядке увеличения индекса n , получаем:

$$\Lambda_{\text{тек}} = \begin{bmatrix} +2 & -4 & -7 \\ +11 & -8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +9 & +1 & +4 & -5 & +10 \\ +12 & -11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -10 & +7 & +5 \\ +11 & -5.0.7 & -5.0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 & -6 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\Phi = (4, 12, 2, 6, 8, 9, 3, 7, 10, 11, 5, 1).$$

На первом цикле выполнения алгоритма $\alpha_k = 4$.

В совокупность $\Lambda_{\text{тек}}$ входят два структурных ориентированных числа, содержащие элементы с идентификатором $\alpha_k = 4$, поэтому необходимо выполнить эквивалентные преобразования чисел совокупности, обеспечив наличие элемента с идентификатором α_k только в одном числе:

$$\Lambda_{\text{тек}} = \begin{bmatrix} +2 & -4 & -7 \\ -3 & -6 & -2 & -1 \\ +11 & -5.0.7 & -5.0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +2 & -7 & +9 & +1 & -5 & +10 \\ +11 & -8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -10 & +7 & +5 \\ +12 & -11 \end{bmatrix}$$

Выполнив п. 6 и 7 алгоритма, получим:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} +2 & -4 & -7 \end{bmatrix}, B = (4),$$

$$\Lambda_{\text{тек}} = \begin{bmatrix} +2 & -7 & +9 & +1 & -5 & +10 \\ +11 & -8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -10 & +7 & +5 \\ +12 & -11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 & -6 & -2 & -1 \\ +11 & -5.0.7 & -5.0.5 \end{bmatrix}.$$

На втором цикле выполнения алгоритма $\alpha_k = 12$. В совокупность $\Lambda_{\text{тек}}$ входит лишь одно число, содержащее элемент с идентификатором $\alpha_k = 12$, поэтому после выполнения п. 6 и 7 алгоритма получим:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} +2 & -4 & -7 \\ +12 & -11 \end{bmatrix}, B = (4, 12),$$

$$\Lambda_{\text{тек}} = \begin{bmatrix} +2 & -7 & +9 & +1 & -5 & +10 \\ +11 & -8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -10 & +7 & +5 \\ +12 & -11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 & -6 & -2 & -1 \\ +11 & -5.0.7 & -5.0.5 \end{bmatrix}.$$

В результате дальнейшего выполнения п. 4 - 9 алгоритма имеем:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} +2 & -4 & -7 \\ -7 & +9 & -5 & +10 & -3 & -6 \\ -5.0.10 & +11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +12 & -11 \\ +11 & -8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 & -6 & -2 & -1 \\ -10 & +7 & +5 \end{bmatrix}$$

$$B = (4, 12, 2, 6, 8, 7, 10),$$

$$B^* = (9, 3, 11, 5, 1).$$

Перейдем к выполнению п. 10 алгоритма. Последнее число совокупности Λ содержит только один элемент с идентификатором который принадлежит множеству ветвей базы, поэтому это число не должно преобразовываться. Предпоследнее число совокупности Λ содержит два элемента с идентификаторами из множества ветвей базы: -10 и +7. В то же время предпоследним элементом множества B является элемент

следовательно, из числа $[-10 +7 +5]$ элемент с идентификатором 10 должен быть исключен. Исключение проведем с помощью линейной комбинации этого числа с последним числом совокупности Λ , умноженным на коэффициент -0.2:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} +2 & -4 & -7 \\ +11 & -8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +12 & -11 \\ +7 & +5 & -0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 & -6 & -2 & -1 \\ -5.0.10 & +11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -7 & +9 & -5 & +10 & -3 & -6 \end{bmatrix}$$

Пятое число совокупности Λ содержит только один элемент из множества B , поэтому число остается без изменений. В четвертом числе совокупности Λ содержится три элемента с идентификаторами из множества ветвей базы: -7, +10, -6. Поскольку на четвертом месте в множестве B расположена ветвь базы 6, то в числе $[-7 +9 -5 +10 -3 -6]$ элементы -7 и +10 должны быть исключены.

Исключение проведем в два этапа, используя числа с порядковыми номерами, большими порядкового номера преобразуемого числа. Первоначально исключим элемент -7. Для этого четвертое число совокупности Λ заменим на линейную комбинацию этого числа с шестым числом:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} +2 & -4 & -7 \\ +11 & -8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +12 & -11 \\ +7 & +5 & -0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 & -6 & -2 & -1 \\ -5.0.10 & +11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +9 & +10 & -3 & -6 & -0.2 \cdot 11 \end{bmatrix}$$

На втором этапе полученное число $[+9 +10 -3 -6 -0.2 \cdot 11]$ заменим на линейную комбинацию этого числа с последним числом совокупности Λ , умноженным на коэффициент 0.2:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} +2 & -4 & -7 \\ +11 & -8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +12 & -11 \\ +7 & +5 & -0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -3 & -6 & -2 & -1 \\ -5.0.10 & +11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +9 & -3 & -6 \\ +11 & -8 \end{bmatrix}$$

Выполняя аналогичные преобразования остальных чисел совокупности Λ , получаем:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -4 & -1 & -9 & +5 & -0.2 \cdot 11 \\ +9 & -3 & -6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} +12 & -11 \\ +11 & -8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ +7 & +5 & -0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -5.0.10 & +11 \end{bmatrix}$$

В соответствии с п. 11 алгоритма частично упорядочим элементы структурных ориентированных чисел совокупности Λ :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -4 & -1 & -9 & +5 & -0.2 \cdot 11 \\ -8 & +11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -12 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -6 & +9 & -3 \end{bmatrix}$$

Конечные данные:

$$B = (4, 12, 2, 6, 8, 7, 10), B^* = (9, 3, 11, 5, 1),$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -4 & -1 & -9 & +5 & -0.2 \cdot 11 \\ -6 & +9 & -3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -12 & +11 \\ -8 & +11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix}.$$

Построение базисных циклов (алгоритм БЦ)

Исходные данные :

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -4 & -1 & -9 & +5 & -0.2 \cdot 11 \\ -6 & +9 & -3 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix}$$

$$V = \{ 9, 3, 11, 5, 1 \}.$$

На первом цикле выполнения алгоритма $\alpha_9 = 9$. Копируя совокупность Λ , получаем:

$$\Lambda_{\text{тек}} = \begin{bmatrix} -4 & -1 & -9 & +5 & -0.2 \cdot 11 \\ -6 & +9 & -3 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix}$$

Первоначально структурное ориентированное число θ_{α_9} , описывающее базисный цикл с определяющим идентификатором $\alpha_9 = 9$, имеет вид

$$\theta_9 = [-9].$$

Элемент с идентификатором $\alpha_9 = 9$ содержится в первом числе совокупности $\Lambda_{\text{тек}}$: $\lambda_4 = [-4 \ -1 \ -9 \ +5 \ -0.2 \cdot 11]$. В этом числе определяющим является элемент с идентификатором 4. Поскольку элемент числа λ_4 с идентификатором $\alpha_9 = 9$ имеет знак минус и коэффициент, равный единице, то

$$\theta_9 = [-9 \ +4],$$

$$\Lambda_{\text{тек}} = \begin{bmatrix} -12 & +11 \\ -2 & -1 & -9 \\ -6 & +9 & -3 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix}$$

Во втором числе совокупности $\Lambda_{\text{тек}}$ также содержится элемент с идентификатором $\alpha_9 = 9$: $\lambda_2 = [-2 \ -1 \ -9]$. Определяющим для этого числа является идентификатор 2, поэтому

$$\theta_9 = [-9 \ +4 \ +2],$$

$$\Lambda_{\text{тек}} = \begin{bmatrix} -12 & +11 \\ -6 & +9 & -3 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix}$$

В состав совокупности $\Lambda_{\text{тек}}$ входит еще одно число, содержащее элемент с идентификатором $\alpha_9 = 9$. Выполняя последовательно п. 5 - 6 алгоритма, получаем:

$$\theta_9 = [-9 \ +4 \ +2 \ -6],$$

$$\Lambda_{\text{тек}} = \begin{bmatrix} -12 & +11 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix}$$

Поскольку ни одно число совокупности $\Lambda_{\text{тек}}$ не содержит элемента с идентификатором $\alpha_9 = 9$, то построение базисного цикла с определяющим идентификатором $\alpha_9 = 9$ завершено и число θ_9 должно быть включено в совокупность θ : $\theta = [-9 \ +4 \ +2 \ -6]$.

Элемент $\alpha_9 = 9$ не является последним в множестве V , поэтому выделяем следующий и продолжаем построение базисных циклов.

Выполняя п. 2 - 8 алгоритма, окончательно имеем:

$$\theta = \begin{bmatrix} -9 & +4 & +2 & -6 \\ -11 & +0.2 \cdot 4 & -12 & -8 & -0.2 \cdot 7 & -0.2 \cdot 10 \\ -5 & -4 & +7 \\ -1 & +4 & +2 \end{bmatrix}$$

2.10.6. Выявление неособых и особых ветвей базы и кобазы

В результате последовательного выполнения алгоритмов БКК и БЦ получены характеристики матрицы структуры токов и напряжений:

$$B = \{ 4, 12, 2, 6, 8, 7, 10 \},$$

$$V = \{ 9, 3, 11, 5, 1 \},$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -4 & -1 & -9 & +5 & -0.2 \cdot 11 \\ -6 & +9 & -3 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -9 \\ -8 & +11 \\ -7 & -5 & +0.2 \cdot 11 \\ -10 & +0.2 \cdot 11 \end{bmatrix}$$

$$\theta = [-9 \ +4 \ +2 \ -6] [-3 \ +6]$$

$$\begin{bmatrix} -11 & +0.2 \cdot 4 & -12 & -8 & -0.2 \cdot 7 & -0.2 \cdot 10 \\ -5 & -4 & +7 \\ -1 & +4 & +2 \end{bmatrix}$$

Множества, задающие типы ветвей, имеют вид:

$$\Phi_1 = \{ 0 \}, \Phi_2 = \{ 4 \}, \Phi_3 = \{ 12 \}, \Phi_4 = \{ 2, 6, 8, 9 \},$$

$$\Phi_5 = \{ 3, 7, 10, 11 \}, \Phi_6 = \{ 5 \}, \Phi_7 = \{ 1 \}.$$

В соответствии с условиями, позволяющими установить неособые и особые ветви базы и кобазы (см. п. 2.8), для рассматриваемой расчетной схемы имеем:

$$B_1^H = \{ \emptyset \},$$

$$B_2^H = \{ 4 \},$$

$$B_3^H = \{ 12 \},$$

$$B_4^H = \{ 8 \},$$

$$B_4^O = \{ 2, 6 \},$$

$$B_5^O = \{ 7, 10 \},$$

$$B_6^O = \{ \emptyset \},$$

$$B_7^O = \{ \emptyset \},$$

$$B_1^{*O} = \{ \emptyset \},$$

$$B_2^{*O} = \{ \emptyset \},$$

$$B_3^{*O} = \{ \emptyset \},$$

$$B_4^{*O} = \{ 9 \},$$

$$B_4^{*H} = \{ \emptyset \},$$

$$B_5^{*H} = \{ 3, 11 \},$$

$$B_6^{*H} = \{ 5 \},$$

$$B_7^{*H} = \{ 1 \}.$$

2.10.7. Формирование уравнений для определения напряжений ветвей базы и токов ветвей кобазы

Для формирования уравнений воспользуемся общими выражениями приведенными в табл. 2.1 и 2.2.

Получим в первую очередь уравнения для неособых ветвей базы токов неособых ветвей кобазы. В рассматриваемой схеме непустыми множествами неособых ветвей базы и кобазы являются множества $B_2^H, B_3^H, B_4^H, B_5^{*H}, B_6^{*H}$ и B_7^{*H} . В соответствии с рекомендованной очередностью формирования уравнений (см. п. 2.8.4) имеем:

$$B_7^{*H} = \{ 1 \} : t_1 = 0,$$

$$B_2^H = \{ 4 \} : u_4 = E_4,$$

$$B_6^{*H} = \{ 5 \} : t_5 = J_5,$$

$$B_3^H = \{ 12 \} : u_{12} = u_{0,12},$$

$$B_5^{*H} = \{ 3, 11 \} : t_3 = t_{0,3}, \\ t_{11} = t_{0,11},$$

$$B_4^H = \{ 8 \} : u_8 = R_8 \cdot A_t (\lambda_8 \cup \Phi_7) = \\ R_8 \cdot A_t (\{ -8 + 11 \} \cup \{ 1 \}) =$$

$$R_8 \cdot A_t (\{ +11 \}) = R_8 \cdot t_{11}.$$

Перейдем к формированию уравнений для определения напряжений токов особых ветвей. В рассматриваемой схеме особыми ветвями являются две ветви базы R-типа, одна ветвь кобазы R-типа и две ветви базы L-типа:

$$B_4^O = \{ 2, 6 \}, B_4^{*O} = \{ 9 \} \text{ и } B_5^O = \{ 7, 10 \}.$$

Число элементов множества B_4^{*O} меньше числа элементов множества B_4^O . Исходя из этого следует формировать систему уравнений для определения токов особых ветвей кобазы R-типа. Поскольку множество B_4^{*O} содержит только один элемент, то формируемая система будет состоять из одного уравнения.

Получим это уравнение, используя общее выражение для системы, определяющей токи особых ветвей кобазы R-типа.

Предварительно отметим, что

$$\Phi \setminus \Phi_4 = \{ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 \} \setminus \{ 2, 6, 8, 9 \} = \\ = \{ 1, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12 \}.$$

Поскольку множество B_4^{*O} содержит только один элемент, то $\alpha_k = 9$, $\alpha_s = 9$ и для единственного слагаемого левой части уравнения получим:

$$A_R (\theta_{\alpha_k}^{\Phi \setminus \Phi_4} \cap \theta_{\alpha_s}^{\Phi \setminus \Phi_4}) t_{\alpha_s} = A_R (\theta_9^{\Phi \setminus \Phi_4} \cap \theta_9^{\Phi \setminus \Phi_4}) t_9 = \\ = A_R (\{ -9+4+2-6 \} \cap \{ -9+4+2-6 \} \cup \Phi_4) t_9 = \\ = A_R (\{ -9+2-6 \} \cap \{ -9+2-6 \}) t_9 = A_R (\{ +9+2+6 \}) t_9 = (R_9 + R_2 + R_6) t_9.$$

Правая часть уравнения представляется в виде:

$$A_{W_4} (\theta_{\alpha_k}^{\{ \alpha_k \} \cup \Phi_1}) = A_{W_4} (\theta_9^{\{ 9 \}}) = A_{W_4} (\{ -9+4+2-6 \} \cup \Phi_4) = \\ = A_{W_4} (\{ -9+4+2-6 \} \cup \Phi_4) = A_{W_4} (\{ +4+2-6 \}) = W_4^4 + W_2^4 - W_6^4.$$

Определим элементы W_4^4, W_2^4 и W_6^4 множества W^4 .

Поскольку ветвь с идентификатором 4 является источником в.д.с, и, следовательно, идентификатор 4 не принадлежит множеству Φ_4 , то $W_4^4 = u_4$. Ветви с номерами 2 и 6 являются резисторами, поэтому

$$W_2^4 = R_2 A_t (\lambda_2 \cup \{ 2 \} \cup \{ 9 \} \cup \{ 1 \}) = R_2 A_t (\{ -2-1-9 \} \cup \{ 2 \} \cup \{ 9 \} \cup \{ 1 \}) \\ = R_2 A_t (\{ \emptyset \}) = 0,$$

$$W_6^4 = R_6 A_t (\lambda_6 \cup \{ 6 \} \cup \{ 9 \} \cup \{ 1 \}) = R_6 A_t (\{ -6+9-3 \} \cup \{ 6 \} \cup \{ 9 \} \cup \{ 1 \}) \\ = R_6 A_t (\{ -3 \}) = R_6 (-t_3).$$

Окончательно формируемое уравнение примет вид:

$$(R_9 + R_2 + R_6) t_9 = u_4 - R_6 (-t_3).$$

Напряжения особых ветвей базы R-типа из множества B_4^O с учетом предыдущего вычисления тока t_9 могут быть определены по уравнениям:

$$u_2 = R_2 A_t (\lambda_2^{(2)} \cup \Psi_7) = R_2 A_t ((-2-1-9)^{(2)} \cup \{1\}) = \\ = R_2 A_t ((-9)) = R_2 (-t_9),$$

$$u_6 = R_6 A_t (\lambda_6^{(6)} \cup \Psi_7) = R_6 A_t ((-6+9-3)^{(6)} \cup \{1\}) = \\ = R_6 A_t ((+9-3)) = R_6 (t_9 - t_3).$$

Переходя к формированию системы уравнений для особых ветвей L-типа, отметим, что множество B_5^0 содержит два элемента, поэтому искомую систему образуют два уравнения. Кроме того,

$$\Psi \setminus \Psi_5 = (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12) \setminus (3, 7, 10, 11) = \\ = (1, 2, 4, 5, 6, 8, 9, 12).$$

Получим первое уравнение системы, используя общее выражение, приведенное в табл. 2.1. При формировании первого уравнения индекс α_k принимает значение первого элемента множества B_5^0 : $\alpha_k = 7$. Индекс α_s должен поочередно принимать значения всех элементов множества B_5^0 . С учетом этого для первого слагаемого первого уравнения имеем: $\alpha_k = 7$, $\alpha_s = 7$. Полагая $\Gamma = I/L$, получаем:

$$A_r ((\lambda_{\alpha_k}^{\Psi \setminus \Psi_5} \cap \lambda_{\alpha_s}^{\Psi \setminus \Psi_5})) u_{\alpha_s} = A_r ((-7-5+0.2 \cdot II)^{\Psi \setminus \Psi_5} \cap (-7-5+0.2 \cdot II)^{\Psi \setminus \Psi_5}) u_7 = \\ = A_r ((-7+0.2 \cdot II) \cap (-7+0.2 \cdot II)) u_7 = A_r ((+7+0.04 \cdot II)) u_7 = \\ = (\Gamma_7 + 0.04 \cdot \Gamma_{11}) u_7.$$

Аналогично для второго слагаемого левой части первого уравнения при $\alpha_k = 7$, $\alpha_s = 10$ найдем:

$$A_r ((\lambda_{\alpha_k}^{\Psi \setminus \Psi_5} \cap \lambda_{\alpha_s}^{\Psi \setminus \Psi_5})) u_{\alpha_s} = A_r ((-7-5+0.2 \cdot II)^{\Psi \setminus \Psi_5} \cap (-10+0.2 \cdot II)^{\Psi \setminus \Psi_5}) u_{10} = \\ = A_r ((-7+0.2 \cdot II) \cap (-10+0.2 \cdot II)) u_{10} = A_r ((+0.04 \cdot II)) u_{10} = \\ = 0.04 \cdot \Gamma_{11} \cdot u_{10}.$$

В соответствии с выражением из табл. 2.1 для уравнения системы определяющей напряжения ветвей базы L-типа, правая часть первого уравнения представляется в виде

$$A_{W^5} (\lambda_{\alpha_k}^{(7)} \cup \Psi_7) = A_{W^5} (\lambda_7^{(7)} \cup \{1\}) =$$

$$= A_{W^5} ((-7-5+0.2 \cdot II)^{(7)} \cup \{1\}) = A_{W^5} ((-5+0.2 \cdot III)) = -W_5^5 + 0.2 \cdot W_{11}^5.$$

Определим элементы множества W^5 . Поскольку ветвь с номером 5 является источником тока, то $W_5^5 = dJ_5 / dt$. Для индуктивной ветви с номером 11 имеем:

$$W_{11}^5 = \Gamma_{11} \cdot A_u (\theta_{11}^{(1)} \cup B_5^0 \cup \Phi_1) =$$

$$= \Gamma_{11} ((-II + 0.2 \cdot 4 - I2 - 8 - 0.2 \cdot 7 - 0.2 \cdot IO)^{(1)} \cup \{7, 10\}) = \\ = \Gamma_{11} ((+0.2 \cdot 4 - I2 - 8)) = \Gamma_{11} (+0.2 \cdot u_4 - u_{12} - u_8).$$

Окончательно первое уравнение принимает вид

$$(\Gamma_7 + 0.04 \cdot \Gamma_{11}) \cdot u_7 + 0.04 \cdot \Gamma_{11} \cdot u_{10} = -dJ_5/dt + 0.2 \cdot \Gamma_{11} (0.2 \cdot u_4 - u_{12} - u_8).$$

При формировании второго уравнения индекс α_k принимает значение второго элемента множества B_5^0 , а индекс α_s - поочередно значения всех элементов этого множества. С учетом этого для левой части второго уравнения имеем:

$$A_r ((\lambda_{\alpha_k}^{\Psi \setminus \Psi_5} \cap \lambda_{\alpha_s}^{\Psi \setminus \Psi_5})) u_{\alpha_s} = A_r ((\lambda_{10}^{\Psi \setminus \Psi_5} \cap \lambda_{10}^{\Psi \setminus \Psi_5})) u_{10} =$$

$$A_r ((-10 + 0.2 \cdot II)^{\Psi \setminus \Psi_5} \cap (-7 - 5 + 0.2 \cdot III)^{\Psi \setminus \Psi_5}) u_7 +$$

$$A_r ((-10 + 0.2 \cdot III)^{\Psi \setminus \Psi_5} \cap (-10 + 0.2 \cdot III)^{\Psi \setminus \Psi_5}) u_{10} =$$

$$A_r ((-10 + 0.2 \cdot III) \cap (-7 + 0.2 \cdot III)) u_7 +$$

$$A_r ((-10 + 0.2 \cdot III) \cap (-10 + 0.2 \cdot III)) u_{10} =$$

$$A_r ((+0.04 \cdot III)) u_7 + A_r ((+10 + 0.04 \cdot III)) u_{10} =$$

$$0.04 \cdot \Gamma_{11} \cdot u_7 + (\Gamma_{10} + 0.04 \cdot \Gamma_{11}) \cdot u_{10}.$$

Правая часть второго уравнения представляется в следующем обобщенном виде:

$$A_{W^5} (\lambda_{10}^{(10)} \cup \Psi_7) = A_{W^5} ((-10 + 0.2 \cdot III)^{(10)} \cup \{1\}) =$$

$$= A_{W^5} ((+0.2 \cdot III)) = 0.2 \cdot W_{11}^5.$$

Поскольку элемент w_{11}^5 уже определен при формировании правой части первого уравнения, то запишем второе уравнение формируемой системы в окончательном виде:

$$0.04 \cdot \Gamma_{11} \cdot u_7 + (\Gamma_{10} + 0.04 \cdot \Gamma_{11}) \cdot u_{10} = 0.2 \cdot \Gamma_{11} (0.2 \cdot u_4 - u_{12} - u_8).$$

Таким образом, система уравнений для определения напряжений особых ветвей базы L-типа имеет вид:

$$\begin{cases} (\Gamma_7 + 0.04 \cdot \Gamma_{11}) u_7 + 0.04 \cdot \Gamma_{11} u_{10} = dJ_5/dt + 0.2 \cdot \Gamma_{11} (0.2 \cdot u_4 - u_{12} - u_8) \\ 0.04 \cdot \Gamma_{11} \cdot u_7 + (\Gamma_{10} + 0.04 \cdot \Gamma_{11}) \cdot u_{10} = 0.2 \cdot \Gamma_{11} (0.2 \cdot u_4 - u_{12} - u_8). \end{cases}$$

2.10.8. Формирование уравнений для определения токов ветвей базы и напряжений ветвей кобазы

Получим уравнения для определения токов ветвей базы. Поскольку $B = (4, 12, 2, 6, 8, 7, 10)$, то

$$\begin{aligned} i_4 &= A_t (\lambda_4^{(4)} \cup \Phi_7) = A_t ([-4 \ -1 \ -9 \ +5 \ -0.2 \cdot II])^{(4)} \cup \{1\} = \\ &= A_t ([-9 \ +5 \ -0.2 \cdot II]) = -i_9 + i_5 - 0.2 \cdot i_{11}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_{12} &= A_t (\lambda_{12}^{(12)} \cup \Phi_7) = A_t ([-12 \ +II])^{(12)} \cup \{1\} = \\ &= A_t (I + II) = i_{11}, \end{aligned}$$

$$i_2 = A_t (\lambda_2^{(2)} \cup \Phi_7) = A_t ([-2 \ -I \ -9])^{(2)} \cup \{1\} = A_t ([-9]) = -i_9,$$

$$\begin{aligned} i_6 &= A_t (\lambda_6^{(6)} \cup \Phi_7) = A_t ([-6 \ +9 \ -3])^{(6)} \cup \{1\} = \\ &= A_t (I + 9 - 3) = i_9 - i_3, \end{aligned}$$

$$i_8 = A_t (\lambda_8^{(8)} \cup \Phi_7) = A_t ([-8 \ +II])^{(8)} \cup \{1\} = A_t (I + II) = i_{11},$$

$$\begin{aligned} i_7 &= A_t (\lambda_7^{(7)} \cup \Phi_7) = A_t ([-7 \ -5 \ +0.2 \cdot II])^{(7)} \cup \{1\} = \\ &= A_t ([-5 \ +0.2 \cdot II]) = -i_5 + 0.2 \cdot i_{11}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_{10} &= A_t (\lambda_{10}^{(10)} \cup \Phi_7) = A_t ([-10 \ +0.2 \cdot II])^{(10)} \cup \{1\} = \\ &= A_t (I + 0.2 \cdot II) = 0.2 \cdot i_{11}. \end{aligned}$$

Поскольку $B^* = (9, 3, 11, 5, 1)$, то уравнения для определения напряжений ветвей кобазы имеют вид:

$$\begin{aligned} u_9 &= A_u (\theta_9^{(9)} \cup \Phi_1) = A_u ([-9 \ +4 \ +2 \ -6])^{(9)} = \\ &= A_u (I + 4 + 2 - 6) = u_4 + u_2 - u_6, \end{aligned}$$

$$u_3 = A_u (\theta_3^{(3)} \cup \Phi_1) = A_u ([-3 \ +6])^{(3)} = A_u (I + 6) = u_6,$$

$$\begin{aligned} u_{11} &= A_u (\theta_{11}^{(11)} \cup \Phi_1) = \\ &= A_u ([-II \ +0.2 \cdot 4 \ -12 \ -8 \ -0.2 \cdot 7 \ -0.2 \cdot 10])^{(11)} = \\ &= A_u (I + 0.2 \cdot 4 - 12 - 8 - 0.2 \cdot 7 - 0.2 \cdot 10) = \end{aligned}$$

$$= 0.2u_4 - u_{12} - u_8 - 0.2u_7 - 0.2u_{10},$$

$$\begin{aligned} u_5 &= A_u (\theta_5^{(5)} \cup \Phi_1) = A_u ([-5 \ -4 \ +7])^{(5)} = \\ &= A_u (I - 4 + 7) = -u_4 + u_7, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_1 &= A_u (\theta_1^{(1)} \cup \Phi_1) = A_u ([-I \ +4 \ +2])^{(1)} = A_u (I + 4 + 2) = \\ &= u_4 + u_2. \end{aligned}$$

2.10.9. Формирование дифференциальных уравнений

Дифференциальные уравнения формируются для ветвей базы С-типа ветвей кобазы L-типа.

Для рассматриваемой схемы

$$B \cap \Phi_3 = (4, 12, 2, 6, 8, 7, 10) \cap (12) = (12);$$

$$B^* \cap \Phi_5 = (9, 3, 11, 5, 1) \cap (3, 7, 10, 11) = (3, 11).$$

Таким образом, система дифференциальных уравнений определяется следующими равенствами:

$$\begin{aligned} \frac{d u_{12}}{d t} &= D_{12} A_t (\lambda_{12}^{(12)} \cup \Phi_7) = D_{12} A_t ((-12 + 11)^{(12)} \cup (1)) = \\ &= D_{12} A_t (1 + 11) = D_{12} t_{11}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d t_3}{d t} &= \Gamma_3 A_u (\theta_3^{(3)} \cup \Phi_1) = \Gamma_3 A_u ((-3 + 6)^{(3)}) = \\ &= \Gamma_3 A_u (1 + 6)^{(3)} = \Gamma_3 u_6. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d t_{11}}{d t} &= \Gamma_{11} A_u (\theta_{11}^{(11)} \cup \Phi_1) = \\ &= \Gamma_{11} A_u ((-11 + 0.2 \cdot 4 - 12 - 8 - 0.2 \cdot 7 - 0.2 \cdot 10)^{(11)}) = \\ &= \Gamma_{11} A_u (1 + 0.2 \cdot 4 - 12 - 8 - 0.2 \cdot 7 - 0.2 \cdot 10) = \\ &= \Gamma_{11} (0.2 \cdot u_4 - u_{12} - u_8 - 0.2 \cdot u_7 - 0.2 \cdot u_{10}). \end{aligned}$$

3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС "РИТМ"

3.1. Общие сведения

Автоматизированное получение уравнений моделирования переходного процесса обеспечивается средствами вычислительного комплекса "РИТМ". Ниже приводятся необходимые сведения по использованию вычислительного комплекса для выполнения курсовой работы.

Вычислительный комплекс образуют:

- система подготовки и корректирования файлов исходных данных;
- система генерации и сопровождения имитационной модели;
- вспомогательные файлы.

Система подготовки и корректирования файлов исходных данных используется для представления исходной информации о задаче в виде текстового файла специального формата. Эта же система позволяет вносить изменения в уже созданные файлы исходных данных.

Файл исходных данных подготавливается средствами вычислительного комплекса индивидуально каждым пользователем. Для того чтобы исключить уничтожение файлов исходных данных, подготовленных разными пользователями, файлы должны иметь уникальные имена. Порядок образования имени файла для каждого пользователя устанавливается преподавателем. Имена файлов задаются и присваиваются во время работы системы подготовки исходных данных.

Система генерации и сопровождения имитационной модели обеспечивает чтение файла исходных данных, контроль данных, генерацию имитационной модели, включая и формирование уравнений переходного процесса для электрической схемы замещения, расчет и регистрацию переменных процесса. Возможны два режима работы системы генерации. В режиме "Уравнения" работа системы заканчивается после получения уравнений переходного процесса для расчетной схемы электрической системы. В режиме "Расчет" обеспечивается моделирование процесса в указанном интервале времени.

Вспомогательные файлы используются для адаптации программных средств к используемой ПЭВМ.

Расчетная схема, для которой необходимо получить уравнения переходного процесса или рассчитать переходный процесс, представляется в виде соединения типовых элементов, которые называются

блоками. Блоки могут быть двухполосными и многополосными. В том случае, если моделируется переходный процесс, то получившаяся имитационная модель может содержать, например, и блоки регистрации переменных процесса, которые не имеют внешних полюсов. В общем случае все блоки имитационной модели должны быть идентифицированы рядом целых чисел.

Каждый блок характеризуется набором переменных. Переменные могут быть схемные и дополнительные. К схемным переменным относятся напряжения и токи ветвей расчетной схемы. Дополнительные переменные не имеют схемного отображения, но также могут использоваться для характеристики блока. Такими переменными, например, являются переменные, принимающие нулевые или единичные значения и характеризующие состояние ключей некоторого сложного блока. Состав переменных блока устанавливается на этапе его разработки, при этом каждой переменной присваивается свой локальный индекс. Для схемных переменных таким индексом является номер ветви схемы размещения блока.

При моделировании переходного процесса между блоками имитационной модели в большинстве случаев необходимо обеспечить обмен значениями переменных. Такой обмен, например, необходим для регистрации значений переменных процесса. Для обеспечения обмена значениями переменных процесса между блоками используется составной идентификатор переменной. Составной идентификатор образуется из номера блока в имитационной модели и локального индекса переменной в блоке. Составной идентификатор должен иметь формат YYXX, где YY - номер блока, XX - локальный индекс переменной.

Порядок работы с программными средствами вычислительного комплекса описан в следующих разделах. При ознакомлении с материалом следует иметь в виду, что использованы обозначения клавиш, принятые на ПЭВМ типа IBM PC. Обозначения клавиш в тексте выделены курсивом. Помимо этого предполагается, что необходимые программные средства вычислительного комплекса предварительно записаны в память вычислительной машины и доступны пользователю.

3.2. Состав исходной информации

В общем случае исходные данные содержат четыре раздела:
- настройка комплекса;

- параметры расчета;
- описание блоков;
- конфигурация расчетной схемы.

В разделе данных "**Настройка комплекса**" для выполнения курсовой работы необходимо конкретизировать только два параметра: "**Промежуточный вывод уравнений**" и "**Режим комплекса**". Для первого параметра следует указать позицию "**Активен**". В том случае, если подготавливаются исходные данные для той части курсовой работы, которая связана с получением на ПЭВМ уравнений, то для второго параметра должна быть указана позиция "**Уравнения**". При моделировании переходного процесса для второго параметра следует указать позицию "**Расчет**". Необходимые позиции для остальных параметров этого раздела данных задаются по умолчанию.

В разделе данных "**Параметры расчета**" должны быть указаны границы интервала времени, для которого следует рассчитать переходный процесс, и задано значение шага расчета. Значения остальных параметров, задаваемых по умолчанию системой подготовки файлов исходных данных, изменения не требуют. Очевидно, что для режима программы "**Уравнения**" данные о параметрах расчета не имеют значения.

В разделе данных "**Описание блоков**" необходимо указать типы используемых блоков, номера, которые присвоены им в имитационной модели, параметры и начальные значения их переменных, идентификаторы внешних переменных, если таковые используются. Для режима программы "**Уравнения**" данные о параметрах блоков и начальных значениях переменных не запрашиваются.

В разделе данных "**Конфигурация расчетной схемы**" указывается, какие полюса и каких блоков соединены между собой.

3.3. Типовые блоки комплекса

Типовые блоки различаются идентификатором, имеющим формат BLTXXX, где XXX - индикатор типа, который может принимать значения от 1 до 999. Блоки могут быть двухполосными, многополосными и не иметь внешних полюсов. Каждому внешнему полюсу блока при разработке программных средств реализации блока присвоен свой номер.

Набор типовых блоков, достаточный для выполнения курсовой

работы, образуют следующие блоки:

- BLT001** - идеальный ключ;
- BLT002** - источник э. д. с.;
- BLT003** - конденсатор;
- BLT004** - резистор;
- BLT005** - катушка индуктивности;
- BLT006** - источник тока;
- BLT007** - идеальный трансформатор;
- BLT014** - осциллограф;
- BLT019** - коммутатор;
- BLT026** - сеть переменного тока;
- BLT071** - трехфазный короткозамыкатель;
- BLT094** - трехфазный резистор.

Блоки **BLT001** - **BLT007** используются для представления схемы, для которой необходимо получить уравнения переходного процесса. Блоки **BLT014**, **BLT019**, **BLT026**, **BLT071** и **BLT094** необходимы для моделирования и регистрации переходного процесса в электрической системе при возникновении короткого замыкания.

Блоки **BLT001** - **BLT006** являются двухполюсниками. Их схемы замещения состоят из одного элемента. Для блоков **BLT001** - **BLT003** - **BLT006** положительное направление для тока и напряжения задано от полюса с номером 1 к полюсу с номером 2. Каждый из этих блоков характеризуется схемными переменными: u_1 и i_1 . Переменные u_1 и i_1 соответствуют мгновенным значениям напряжения и тока единственного элемента схемы замещения блока. Э. д. с. блока **BLT002** направлена от полюса с номером 1 к полюсу с номером 2, однако следует иметь в виду, что положительное направление для тока и напряжения задано от полюса с номером 2 к полюсу с номером 1. Блок также характеризуется схемными переменными u_1 и i_1 . При этом с учетом принятого положительного направления тока и напряжения переменная u_1 соответствует мгновенному значению э. д. с., а переменная i_1 противоположна мгновенному значению тока источника.

Идеальный трансформатор является четырехполюсником. Полюсы с номерами 1 и 2 относятся к первичной обмотке, полюсы с номерами 3 и 4 - ко вторичной. Положительные направления для токов обмоток заданы от полюсов с номерами 1 и 4. Коэффициент трансформации определен как отношение напряжения между полюсами 3 и 4 к напряже-

нию между полюсами 1 и 2. Блок не имеет переменных, значения которых могут быть переданы в другие блоки имитационной модели.

Блок **BLT014** предназначен для регистрации переходного процесса во время расчета. Блок не имеет ни переменных, ни внешних полюсов. Исходными данными для блока являются:

- тип осциллографа: управляемый или неуправляемый;
- размер поля осциллографирования и информация для идентификации осциллограмм;
- список осциллографируемых функций и их максимальные значения, принимаемые за единицу оси ординат;
- информация о распределении функций по лучам и цвет их изображения.

В том случае, если задан неуправляемый осциллограф, то его включение происходит в указанное время. В случае выбора управляемого осциллографа его включение может быть произведено в любой момент расчета по команде пользователя.

По умолчанию системой подготовки файлов исходных данных задается максимальный размер поля осциллографирования. При желании он может быть уменьшен и необходимым образом размещен на экране монитора заданием координат левого нижнего угла. К информации идентификации относится также перечень осциллографируемых функций с указанием цвета и знака маркировки.

Максимальное указываемое значение функции используется для расчета масштаба осциллографирования. Этому значению соответствует максимальная отметка по оси ординат, равная единице. В том случае, если достигаемое значение превышает максимальное указанное значение, то регистрация мгновенных значений производится без изменения масштаба в пределах поля осциллографирования. При выходе точки за пределы поля осциллографирования регистрация ведется по кромке поля.

Одновременно возможно осциллографирование до 100 функций, при изображении которых допустимо использовать 16 цветов и применять маркировку специальными знаками. Осциллографируемые функции по усмотрению пользователя могут воспроизводиться относительно различных осей абсцисс (лучей), число которых может достигать десяти.

Блок **BLT019** предназначен для изменения состояния ключевых элементов блоков имитационной модели и при выполнении курсовой работы используется для организации в желаемый момент времени ко-

элек
Е.Н.

матем
перез
систе
матем
необх
Приво
испол

Пособ.
повыше
электр

I
Санкт-

роткого замыкания.

Блок не имеет ни переменных, ни внешних полюсов. Исходной информацией для блока является момент времени изменения состояния ключевых элементов, их новое состояние и новые критерии коммутации (см. описание блока **BLT071**).

Блок **BLT026** является макромоделью сети переменного тока конечной мощности. Схему замещения блока образуют три синусоидальные э. д. с. **e1-e3**, соединенные в звезду, последовательно с которыми включены индуктивности **L4-L6**. Блок имеет три фазных полюса и полюс нейтрали. Полюсам фаз А, В и С присвоены номера 1, 2 и 3 соответственно. Полюс нейтрали имеет номер 4. Положительное направление для токов и напряжений источников э. д. с. задано к полюсу с номером 4. Положительное направление токов и напряжений индуктивностей заданы к полюсам 1, 2 и 3. Блок характеризуется схемными переменными: **u1-u6** и **i1-i6**. Исходя из принятого положительного направления токов и напряжений ветвей схемы замещения блока следует, что переменные **u1-u3** соответствуют мгновенным значениям фазных э. д. с., переменные **u4-u6** - мгновенным значениям напряжения на индуктивностях, **i1-i3** - противоположны мгновенным значениям фазных токов, а **i4-i6** соответствуют мгновенным значениям фазных токов.

Исходными данными для блока являются:

- амплитуда э. д. с.;
- частота сети;
- начальная фаза э. д. с. фазы А;
- индуктивность сети;
- начальные значения токов фаз;
- характерные значения токов фаз.

Характерные значения токов фаз используются для контроля точности расчета и должны с точностью до порядка соответствовать фактическим токам индуктивностей схемы замещения системы.

Блок **BLT071** используется для организации короткого замыкания. Блок имеет три фазных полюса и полюс нейтрали. Полюсам фаз А, В и С присвоены номера 1, 2 и 3 соответственно. Полюс нейтрали имеет номер 4. Схему замещения блока образуют четыре ключа, соединенные в звезду. Каждый ключ соединен с полюсом, номер которого совпадает с номером ключа в схеме замещения блока. Положительное направление токов ключей **K1-K3** задано от полюсов 1, 2 и 3, положительное направление тока ключа **K4** - к ключу с номером 4.

Для характеристики блока может использоваться номинальный и расширенный состав переменных. Номинальный состав переменных блока образуют токи и напряжения каждого ключа схемы замещения. Расширенный состав переменных включает еще четыре дополнительные переменные, характеризующие состояние каждого ключа. Переменные **X5-X8** принимают нулевые значения, если ключи **K1-K4** находятся в непроводящем состоянии, и значения, равные единице, если ключи замкнуты. Состояние каждого ключа устанавливается с учетом выполнения условий, называемых критериями коммутации. Ключ переводится в проводящее состояние в моменты времени, когда напряжение на нем станет равным напряжению замыкания. Размыкание ключа обеспечивается в моменты времени, когда ток ключа уменьшается до тока отключения.

Исходная информация для блока:

- состояние каждого ключа (проводящее или непроводящее);
- критерии коммутации ключа (значения напряжения замыкания и тока отключения);
- состав переменных;
- тип модели ключей.

При выполнении курсовой работы в качестве модели ключа следует использовать "идеальный ключ" и для каждого ключа блока задать равные значения относительного сопротивления и относительной проводимости.

Блок **BLT094** является макромоделью трехфазного резистора и предназначен для задания активных потерь сети переменного тока. Схему замещения блока образуют три резистора **R1-R3**. Блок имеет шесть полюсов. Полюсам резистора фазы А присвоены номера 1 и 4, резистора фазы В - 2 и 5, резистора фазы С - 3 и 6. Положительные направления для токов и напряжений резисторов заданы от полюсов с меньшими номерами. Блок характеризуется схемными переменными **u1-u3** и **i1-i3**.

3.4. Описание конфигурации расчетной схемы

Исходная расчетная схема должна быть представлена в виде схемы соединения типовых блоков вычислительного комплекса. Каждому блоку следует присвоить порядковый номер.

Описание конфигурации расчетной схемы состоит в перечисле-

нии соединяемых полюсов блоков, а также полюсов, которые не имеют соединений.

Для получения описания необходимо в любом порядке для каждого узла расчетной схемы перечислить идентификаторы соединяемых полюсов блоков. Идентификатор полюса образуется из номера блока в расчетной схеме и номера полюса блока и должен иметь форму **XXYY**, где **XX** - номер блока, **YY** - номер полюса. Номер полюса обязательно должен содержать два разряда: **02, 07, 12, ...** и т. д. Идентификаторы полюсов, принадлежащие различным узлам расчетной схемы, в описании структуры должны быть отделены нулями. Следует специально отметить необходимость описания и тех узлов расчетной схемы, которые образованы только примыканием полюса некоторого блока и не имеют примыканий полюсов других блоков.

3.5. Система подготовки и корректирования файлов исходных данных

3.5.1. Запуск системы

Система оформлена в виде загрузочного модуля с именем **rform.exe** и содержится в директории учебной группы. С целью предотвращения сбоев в работе системы из-за некорректных действий пользователей в директории учебной группы для каждой бригады созданы поддиректории, в которых содержится файл с именем **rform.bat**. Для запуска системы подготовки и корректирования файлов исходных данных из поддиректории курсор необходимо установить в строку **rform.bat** и нажать клавишу **"Enter"**. Работа системы начинается с отображения файловой структуры диска с текущей директории с добавлением двух опций **"Новый файл"** и **"Смена диска"**.

Если файл исходных данных еще не создавался, то следует выбрать опцию **"Новый файл"** и нажать клавишу **"Enter"**. Далее производится запрос имени создаваемого файла. В том случае, если файл исходных данных уже создан, то курсор следует установить в строку с именем файла и нажать клавишу **"Enter"**. Эти действия обеспечивают загрузку указанного файла исходных данных.

После успешной загрузки файла исходных данных на экран монитора выводится Главное меню системы подготовки и корректирования файлов исходных данных. Для справки, облегчающей работу с системой, может использоваться информация, содержащаяся в нижней стро-

ке экрана монитора.

3.5.2. Главное меню системы

Главное меню системы имеет семь позиций.

Позиция **"Настройка комплекса"** дает возможность изменять режим работы комплекса и задавать его модификацию, обеспечивающую решение текущей задачи наиболее оптимальным образом.

Позиция **"Задание на расчет"** позволяет указать интервал расчета, значение шага расчета и необходимые параметры для оценки точности расчета переходного процесса.

Позиция **"Описание блоков"** обеспечивает доступ к вводу и корректированию состава и числовых данных блоков, используемых в имитационной модели электрической системы.

Позиция **"Описание структуры"** позволяет задать или откорректировать описание конфигурации расчетной схемы.

Позиция **"Новый файл"** предоставляет пользователю возможность после завершения работы с текущим файлом исходных данных начать работу с другим файлом без выхода из системы подготовки и корректирования файлов исходных данных.

Позиция **"Прямое редактирование"** позволяет провести непосредственное редактирование загруженного файла исходных данных средствами редактора **Norton Editor**. При выполнении курсовой работы использовать такую возможность редактирования файла исходных данных не рекомендуется.

Позиция **"Конец работы"** позволяет после завершения работы с загруженным файлом исходных данных прервать работу системы подготовки и корректирования файлов исходных данных.

Выбор позиции Главного меню обеспечивается установкой курсора в соответствующую строку меню и нажатием клавиши **"Enter"**. Для справки, облегчающей работу с системой, может использоваться информация, содержащаяся в нижней строке экрана монитора.

3.5.3. Позиция Главного меню "Настройка комплекса"

Выбор позиции Главного меню **"Настройка комплекса"** сопровождается появлением подменю настройки. Подменю настройки имеет три

позиции. Выбор позиции обеспечивается установкой курсора в соответствующую строку и последующим нажатием клавиши "Enter" или сразу нажатием функциональной клавиши, обозначение которой указано в скобках в каждой позиции подменю.

Позиция "Изменение настроек" дает возможность внести коррективы в текущую настройку комплекса. После нажатия клавиши "Enter" на экране монитора появляется список настроек. Выбор корректируемой настройки обеспечивается установкой курсора в соответствующую строку и нажатием клавиши "Enter". Далее с помощью клавиши перемещения курсора вниз устанавливается желаемый вариант настройки. Фиксация настройки обеспечивается повторным нажатием клавиши "Enter".

Позиция "Загрузка стандарта" обеспечивает генерацию файла исходных данных с настройками комплекса, задаваемыми системой подготовки по умолчанию.

Позиция "Выход в Главное меню" используется для выхода в подменю "Настройка комплекса".

3.5.4. Позиция Главного меню "Задание на расчет"

Выбор позиции Главного меню "Задание на расчет" сопровождается появлением подменю. Подменю имеет пять позиций. Выбор желаемой позиции обеспечивается установкой курсора в соответствующую строку и нажатием клавиши "Enter" или сразу нажатием указанной функциональной клавиши.

Позиция "Задание параметров" дает возможность указать границы интервала времени, для которого следует выполнить расчет переходного процесса, определить допустимую погрешность расчета, задать область одновременности событий, указать допустимые дисбалансы по току и напряжению, назначить число интервалов расчета.

Границы интервала расчета устанавливаются каждым пользователем самостоятельно.

Для допустимой погрешности расчета целесообразно указать значение от 1 % до 5 %.

Область одновременности событий может быть полезна для имитационных моделей с большим числом ключевых элементов. Она позволяет объединить события при незначительных отличиях в моменты времени их возникновения и тем самым ускорить выполнение расчета.

К таким событиям, например, относятся моменты генерации управляющих импульсов для тиристоров и моменты выполнения критериев коммутации для ключевых элементов. Ближайшие по моментам возникновения события могут рассматриваться как одновременные, если моменты их возникновения отстоят от наименьшего момента не более чем на величину области одновременности. Из смысла области одновременности следует, что она должна быть незначительной и не превышать принятого шага расчета.

Значения допустимых дисбалансов по току и напряжению необходимы при расчете переходных процессов в идеализированных схемах, в которых возможны мгновенные изменения токов индуктивностей и напряжений конденсаторов при коммутациях. При выполнении курсовой работы такие ситуации не встречаются, поэтому значения допустимых дисбалансов могут быть приняты такими, которые задаются системой по умолчанию.

Параметр "Число интервалов расчета" позволяет, если это необходимо, назначить несколько последовательных интервалов расчета, для которых задаются различные значения шага расчета. При выполнении курсовой работы достаточно указать один интервал расчета.

После задания числа интервалов расчета и нажатия клавиши "Enter", а также подтверждения заданных параметров повторным нажатием клавиши "Enter" предоставляется возможность выполнить описание интервалов расчета. Это описание предполагает указание границ последовательных интервалов и значения шага расчета для каждого интервала. В качестве величины шага расчета целесообразно брать значение, соответствующее в секундах 5 - 10 градусам периода наивысшей частоты, с которой протекают процессы в расчетной схеме. Например, если в расчетной схеме наивысшая частота составляет 50 Гц, то рекомендуемое значение шага расчета может быть определено следующим образом:

$$h = \frac{5 - 10}{360 \times 50}$$

После описания всех интервалов расчета и подтверждения правильности заданных значений автоматически обеспечивается выход в подменю "Задание на расчет".

элек
Е.Н.

матем
перез
систе
матем
необх
Приво
испол

Пособ.
повыше
электр

I
Санкт-

Позиция подменю **"Просмотр параметров"** позволяет визуально проконтролировать заданные параметры.

Позиция подменю **"Загрузка стандарта"** обеспечивает задание параметров расчета по умолчанию. Заданные значения появляются на экране монитора сразу после установления курсора в эту позицию и нажатия клавиши **"Enter"**.

Позиция подменю **"Информационные строки"** может использоваться для дополнительной идентификации файла исходных данных. При выборе этой позиции система предоставляет возможность ввести любую информацию в объеме пяти строк, которая будет перенесена в первые пять строк файла исходных данных. Информационные строки могут заполняться как с использованием латинского алфавита, так и кириллицы. Переход от латинского алфавита к кириллице и обратно обеспечивается одновременным нажатием двух клавиш **"Shift"**. Следует иметь в виду, что в случае, когда при подготовке информационных строк использовалась кириллица, после завершения подготовки строк для продолжения нормальной работы системы необходимо вернуться к использованию латинского алфавита. В том случае, если позиция **"Информационные строки"** игнорируется, то первые пять строк файла исходных данных будут содержать по одному знаку **"*"**.

При выполнении курсовой работы в информационных строках целесообразно указать вариант задания, номер группы и имя исполнителя.

Последняя позиция подменю используется для возврата в Главное меню системы подготовки и корректирования файлов исходных данных.

3.5.5. Позиция Главного меню **"Описание блоков"**

Выбор позиции Главного меню **"Описание блоков"** сопровождается появлением подменю описания блоков. Подменю содержит шесть позиций. Выбор желаемой позиции обеспечивается установкой курсора в соответствующую строку и нажатием клавиши **"Enter"** или сразу нажатием указанной функциональной клавиши.

Позиция **"Ввод данных блоков"** предназначена для первоначального описания блоков имитационной модели.

Позиция **"Корректирование данных блоков"** используется для

внесения изменений в ранее описанный блок.

Позиция **"Копирование блока"** предоставляет возможность копированием данных провести описание идентичных блоков.

Позиция **"Исключение блока"** предназначена для удаления из файла исходных данных описания блока с задаваемым номером.

Позиция **"Сводка блоков"** служит для предоставления информации о блоках имитационной модели, описание которых уже проведено.

Последняя позиция подменю обеспечивает возврат в Главное меню.

3.5.5.1. Позиция подменю **"Ввод данных блоков"**

Выбор позиции сопровождается появлением меню блоков.

Первая строка меню блоков содержит две точки и по аналогии с **Norton Commander** служит для возврата в подменю описания блоков.

Вторая строка меню блоков позволяет задать режим отображения меню: с иллюстрациями или без них. После установки курсора в эту строку и нажатия клавиши **"Enter"** появляется подменю опций настройки, содержащее две строки. Первая строка служит для возврата в меню блоков. С помощью второй строки задается режим меню блоков. После установки курсора в эту строку каждое нажатие клавиши **"Enter"** сопровождается изменением настройки. Фиксация нужной настройки обеспечивается переводом курсора в первую строку и нажатием клавиши **"Enter"**.

Последующие строки меню блоков содержат либо идентификатор типового блока комплекса, либо наименование директории, объединяющей некоторые блоки. Перемещение курсора в строку с идентификатором типового блока сопровождается появлением графического образа блока с обозначением внешних полюсов и присвоенных им номеров, а также схемы замещения блока с идентификацией ветвей и указанием принятых положительных направлений для токов и напряжений либо списка переменных блока. Нажатие клавиши **"Enter"** обеспечивает переход к описанию выбранного блока. Если курсор устанавливается в строку с наименованием директории, то в левом окне меню блоков появляется список идентификаторов типовых блоков, объединенных в данную директорию. После выбора директории, содержащей идентификатор нужного блока, и последующего нажатия клавиши **"Enter"** появляется меню блоков директории. Далее курсор следует установить в

элек
Е.Н.

матем
перез
систе
матем
необх
Приво
испол

Пособ
повыше
электр

I
Санкт-

строку меню, содержащую идентификатор нужного типового блока, и последующим нажатием клавиши **"Enter"** перейти к описанию выбранного блока.

Описание блока начинается с указания номера, который присвоен блоку в имитационной модели. Состав последующих исходных данных определяется типом блока и сводится к выбору допустимой опции вариантного запроса или заполнению таблиц исходных данных, генерируемых системой.

Вариантный запрос появляется в виде строки, содержащей сам запрос, и за двоеточием - одну из возможных его опций. Смена опций запроса обеспечивается клавишами перемещения курсора. Фиксация нужной опции осуществляется нажатием клавиши **"Enter"**.

Таблицы исходных данных содержат три поля: поле наименования параметра, поле принятой единицы измерения и поле значения. Перемещение курсора в пределах поля значения осуществляется клавишами **"Стрелка вправо"**, **"Стрелка влево"**. Перемещение курсора по таблице обеспечивается клавишами **"Стрелка вверх"**, **"Стрелка вниз"**. Следует иметь в виду, что для блоков некоторых типов на экране монитора высвечивается только фрагмент таблицы исходных данных. Признаком продолжения таблицы является наличие стрелки в правом верхнем или нижнем углу фрагмента. Построчная протяжка таблицы в этом случае осуществляется клавишами **"Стрелка вверх"** и **"Стрелка вниз"**, а постраничная - клавишами **"PgUp"** и **"PgDn"**. При описании блока пользователю необходимо заполнить третье поле предлагаемых таблиц исходных данных. После заполнения очередной таблицы следует нажать клавишу **"Enter"** и выбрать одну из позиций контрольного меню, которое появляется на экране. Выбор соответствующей позиции позволяет либо подтвердить окончание заполнения таблицы, либо вернуться к редактированию данных заполненной таблицы, либо отметить фиксацию введенных данных. В последнем случае после окончания работы системы файл исходных данных будет содержать либо те значения параметров, которые предлагаются системой по умолчанию, либо значения параметров, которые были заданы до последнего сеанса работы с системой подготовки и редактирования файлов данных.

Для ускорения подготовки файла исходных данных после завершения описания очередного блока системой предоставляется возможность продолжения описания блоков имитационной модели текущего типа без выхода в меню блоков. Для этого необходимо выбрать одну из позиций меню, появляющегося на экране. Выбор позиции **"Еще но-**

мер блока" обеспечивает описания очередного блока текущего типа в полном объеме. Выбор позиции **"Размножение"** позволяет копированием исходных данных текущего блока провести описание идентичных блоков имитационной модели. Позиция **"Сводка блоков"** служит для предоставления информации об уже описанных блоках. Выбор этой позиции сопровождается появлением таблo с номерами блоков текущего типа, а также номерами блоков, которые присвоены уже описанным блокам имитационной модели, и идентификаторами их типа. Протяжка информации таблo в нужном направлении обеспечивается клавишами **"Стрелка влево"**, **"Стрелка вправо"**. Последняя позиция меню предназначена для выхода в меню блоков.

При подготовке файла исходных данных необходимо провести описание всех блоков имитационной модели. Однако следует отметить, что система предоставляет возможность покинуть меню блоков после окончания описания очередного блока. Для этого курсор следует установить в первую строку и нажать клавишу **"Enter"**.

3.5.5.2. Позиция подменю "Корректирование данных блоков"

Выбор позиции сопровождается появлением меню блоков, описание которых уже проведено, с указанием присвоенного в имитационной модели номера.

Первая строка меню содержит две точки и предназначена для возврата в подменю описания блоков.

Вторая строка меню используется для задания режима отображения блоков: с иллюстрациями или без них (см. раздел 3.5.5.1).

Последующие строки меню содержат номера, которые присвоены блокам имитационной модели, и словесное указание типа блока.

Для проведения корректирования данных блока необходимо установить курсор в соответствующую строку и нажать клавишу **"Enter"**. Далее система воспроизводит все вариантные запросы и таблицы с исходными данными, которые подготовлены при описании блока, и предоставляет возможность их корректирования (о способах корректирования опций вариантных запросов и данных таблиц см. раздел 3.5.5.1).

3.5.5.3. Позиция подменю "Копирование блока"

Выбор позиции приводит к запросу номера копируемого блока, числа идентичных блоков и последовательному указанию номеров идентичных блоков, которые присвоены им в имитационной модели.

3.5.5.4. Позиция подменю "Сводка блоков"

Выбор позиции сопровождается появлением таблицы с номерами блоков, которые присвоены уже описанным блокам имитационной модели, и идентификаторами их типа. Протяжка информации таблицы в нужном направлении обеспечивается клавишами **"Стрелка влево"**, **"Стрелка вправо"**.

3.5.5.5. Позиция подменю "Исключение блока"

Выбор позиции инициирует запрос номера исключаемого блока. Для того чтобы избежать ошибочного исключения из файла исходных данных описания блока, системе необходимо после специального запроса дополнительно подтвердить факт исключения блока с указанным номером.

3.5.6. Позиция Главного меню "Описание структуры"

Выбор позиции Главного меню **"Описание структуры"** сопровождается появлением подменю, которое в свою очередь содержит четыре позиции. Выбор желаемой позиции обеспечивается установкой курсора в соответствующую строку и нажатием клавиши **"Enter"** или сразу нажатием указанной функциональной клавиши.

Позиция подменю **"Редактирование структуры"** предназначена для первоначального описания конфигурации расчетной схемы имитационной модели или ее корректирования. Выбор позиции приводит к появлению фрагмента поля описания конфигурации. Перемещение курсора по видимой части фрагмента поля, а также построчная протяжка поля осуществляется клавишами **"Стрелка вниз"**, **"Стрелка вверх"**, постраничная протяжка - клавишами **"PgUp"** и **"PgDn"**, клавиша **"Home"**

обеспечивает установку начала поля описания конфигурации. Стрелки в правом верхнем и нижнем углах видимого фрагмента поля свидетельствуют о наличии предшествующих и последующих строк поля описания конфигурации. Для удобства описания и последующего контроля каждая строка поля конфигурации размечена нулями. Перемещение курсора до очередного нуля обеспечивается клавишами **"Стрелка вправо"**, **"Стрелка влево"**, для перехода к очередному участку строки необходимо одновременно нажать клавишу перемещения курсора и клавишу **"Ctrl"**.

Описание конфигурации расчетной схемы имитационной модели сводится к перечислению идентификаторов полюсов блоков, которые либо соединены между собой, либо оставлены без соединения. Перечисление идентификаторов полюсов следует начинать с первой строки фрагмента поля описания структуры таким образом, чтобы каждый идентификатор заканчивался в позиции очередного нуля. Идентификаторы полюсов, относящиеся к различным узлам расчетной схемы, при описании конфигурации должны быть разделены нулем. Для удобства возможного последующего корректирования описания конфигурации расчетной схемы имитационной модели допускается перечисление идентификаторов полюсов блоков, образующих каждый узел, начинать с новой строки поля описания конфигурации.

После описания всех узлов расчетной схемы, включая и узлы, образованные полюсами блоков без соединения, необходимо нажать клавишу **"Enter"** и выбрать одну из позиций контрольного меню, которое появляется на экране. Выбор соответствующей позиции позволяет либо подтвердить окончание описания конфигурации, либо вернуться к продолжению описания или его корректированию, либо отменить фиксацию подготовленного описания или внесенных изменений. В последнем случае после окончания работы системы файл исходных данных либо вообще не будет содержать описания конфигурации, либо содержать то описание, которое было подготовлено ранее.

Позиция подменю **"Обнуление структуры"** обеспечивает первоначальное восстановление описания конфигурации расчетной схемы имитационной модели и может быть полезна при подготовке новых файлов данных на основе использования ранее подготовленных файлов, содержащих, например, значительную часть тех же блоков, но с другой схемой соединения. После обнуления структуры обеспечивается выход в подменю, и описание конфигурации расчетной схемы может быть подготовлено выбором позиции подменю **"Редактирование структуры"**.

элек
Е.Н.матем
перел
систе
матем
необх
Приво
исполПособ
повыше
электрI
Санкт-

Позиция подменю "Выход без сохранения" предназначена для отмены фиксации выполненного описания конфигурации расчетной схемы. Выбор этой позиции обеспечивает выход в Главное меню, а последующее окончание работы системы приведет к тому, что файл исходных данных будет содержать то описание конфигурации, которое имело место до начала работы системы.

Последняя позиция подменю обеспечивает выход в Главное меню системы.

3.5.7. Резервный файл исходных данных

Результатом работы системы подготовки и корректирования файлов исходных данных является текстовый файл специальной структуры, который используется в качестве входного файла для системы генерации и сопровождения имитационной модели.

В том случае, если система подготовки и корректирования файлов исходных данных применялась для внесения исправлений в существующий файл или для его дополнения, то в результате работы системы наряду с обновленным файлом исходных данных генерируется также файл с расширением **.bak**, который является копией исходного файла до начала внесения изменений. Этот файл может использоваться для продолжения работы в случае утраты файла исходных данных вследствие сбоя ПЭВМ во время работы системы. Утраченный файл исходных данных может быть легко восстановлен простым переименованием резервного файла.

3.6. Система генерации и сопровождения имитационной модели

3.6.1. Запуск системы

Система оформлена в виде загрузочного модуля с именем **ritm.exe** и содержится в директории учебной группы. Для запуска системы из поддиректории бригады необходимо курсор установить в строку **ritm.bat** и нажать клавишу "Enter".

Работа системы начинается с запроса имени файла исходных данных и имени, которое должно быть присвоено выходным файлам. В том случае, если система обнаружит, что выходной файл с указанным

именем существует, то на экран выдается аварийное сообщение и предлагается задать новое имя или прекратить расчет.

При выполнении курсовой работы единственным выходным файлом системы генерации и сопровождения имитационной модели является файл с расширением **.inf**, который называется информационным. Этот текстовый файл содержит информацию, идентифицирующую задачу, листинг исходных данных, листинг выводимых результатов расчета, а также диагностические сообщения.

Если в процессе работы система при записи в выходной файл с расширением **.inf** фиксируется переполнением диска, то система прекращает свою работу с соответствующим выводом на экран аварийного сообщения.

Признаком окончания работы системы генерации и сопровождения имитационной модели является изменение окраски экрана или появление сообщения "Stop - program terminated". В первом случае система находится в состоянии ожидания, и для возврата управления операционной системе следует нажать клавишу "F10". Второй случай свидетельствует об аварийной ситуации, и для передачи управления операционной системе необходимо нажать клавишу "Enter".

Для досрочного прекращения работы системы генерации и сопровождения имитационной модели следует нажать клавишу "F10".

3.6.2. Просмотр, удаление и печать информационного файла

Для просмотра информационного файла необходимо курсор установить в строку, содержащую имя выходного файла с расширением **.inf**, и нажать клавишу "F3". Протяжка файла осуществляется построчно клавишами "Стрелка вверх" и "Стрелка вниз", а постранично клавишами "PgUp" и "PgDn". Для завершения просмотра необходимо нажать клавишу "F10" или "Esc".

В том случае, если информационный файл содержит диагностические сообщения и требуется после исправления файла исходных данных повторный запуск системы генерации и сопровождения имитационной модели, то текущий информационный файл обязательно должен быть удален. Для удаления файла курсор необходимо установить в строку с именем файла и нажать клавишу "F8".

Для получения печатной копии информационного файла необходимо:

элек.
Е.Н.

- подготовить печатающее устройство;
- установить курсор в строку выводимого файла;
- нажать клавишу "F5";
- набрать ключевое слово "prn";
- нажать клавишу "Enter".

матем
перех
систе
матем
необх
Приво
испол

Пособ.
повыш
электр

I
Санкт-

3.6.3. Осциллографирование переменных переходного процесса

Осциллографирование переменных переходного процесса может быть выполнено средствами блока BLT014, который может имитировать управляемый и неуправляемый осциллограф.

Если используется неуправляемый осциллограф, то его включение будет обеспечено, начиная с указанного момента времени. Для включения управляемого осциллографа необходимо предварительно нажать клавишу "F7" и указать интервал осциллографирования.

Осциллографирование прекращается в случаях:

- окончания интервала регистрации;
- после нажатия клавиши "F8" для управляемого осциллографа;
- при завершении расчета.

О завершении осциллографирования свидетельствует изменение содержания справочной строки внизу экрана: появление сообщений о малой и большой копии экрана и действиях для продолжения расчета.

Для получения копии экрана формата А4 необходимо нажать клавишу "F4", для получения копии размером в половину формата А4 - клавишу "F3". После завершения печати осциллограмм для продолжения расчета следует два раза нажать клавишу "Enter".

В том случае, если нет необходимости в печати осциллограмм переменных переходного процесса, то после прекращения осциллографирования следует сразу два раза нажать клавишу "Enter".

4. ПОЛУЧЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА НА ЭВМ

4.1. Цифровое описание конфигурации расчетной схемы

Исходная расчетная схема должна быть представлена в виде соединения типовых блоков комплекса (см. раздел 3.3).

Каждый полюс типового блока имеет свой номер. Поскольку положительное направление тока и напряжения ветви схемы замещения каждого блока имеют определенную ориентацию относительно внешних полюсов, то исходная расчетная схема должна быть представлена в виде соединения типовых блоков с учетом положительных направлений токов и напряжений, принятых при формализованном получении уравнений. После такого представления исходной расчетной схемы для получения цифрового описания ее конфигурации необходимо перечислить идентификаторы соединенных между собой полюсов. Напомним, что идентификатор полюса образуется из номера блока, который присвоен ему в имитационной модели, и номера полюса, обязательно представленного двумя разрядами: 01, 02 и т.д. Заметим, что для совпадения уравнений, полученных формализованным способом и на ЭВМ, блокам расчетной схемы должны быть присвоены те же номера, что и соответствующим ветвям исходной расчетной схемы. Каждому блоку BLT007 (идеальный трансформатор) следует присвоить номер одной из обмоток идеального трансформатора в расчетной схеме.

Пример. Получить цифровое описание конфигурации исходной расчетной схемы, приведенной на рис. 2.1.

Представим исходную расчетную схему в виде схемы соединения типовых блоков комплекса.

С учетом принятых в 2.10.1 положительных направлений токов и напряжений ветвей исходной расчетной схемы и принятых при разработке типовых блоков номеров внешних полюсов и заданных положительных направлений токов и напряжений ветвей схемы замещения блоков исходная расчетная схема примет вид, изображенный на рис. 4.1.

В полученной схеме сохранены принятые ранее положительные направления токов и напряжений и соответствующим блокам присвоены те же номера, что и ветвям исходной расчетной схемы. Исключение составляет блок BLT007 (идеальный трансформатор), которому присвоен номер одной из обмоток исходной расчетной схемы. На схеме также указаны номера полюсов каждого блока.

Для полученной расчетной схемы имеем следующее цифровое описание ее конфигурации:

У)
Э.
Е.
МЕ
ПЕ
СУ
МЕ
НЕ
Пр
ИС
По
по
эл
Са

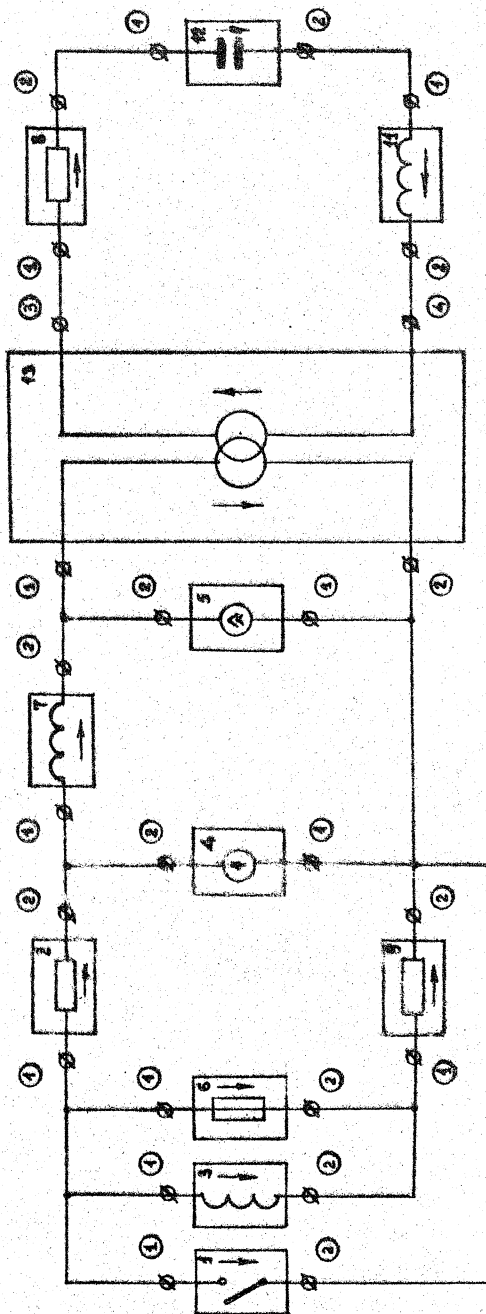


Рис. 4.1. Расчетная схема в виде соединения типовых блоков комплекса

- 202 402 701
- 702 502 1301
- 102 401 501 1302 902
- 302 602 901
- 1303 801
- 802 1201
- 1202 1101
- 1304 1102

Здесь идентификаторы соединяемых полюсов перечислены в отдельной строке.

При задании конфигурации расчетной схемы для автоматизированного получения уравнений переходного процесса идентификаторы соединенных полюсов следует либо также указывать отдельной строкой, либо разделять нулями.

4.2. Порядок получения уравнений

Для получения уравнений необходимы следующие действия.

1. Подготовить файл исходных данных, залустив из поддиректории бригады на выполнение `gform.bat`.
 - 1.1. Проверить настройки комплекса и, если необходимо, для настройки "Промежуточный вывод уравнений" указать значение "Активен", а для настройки "Результат" установить значение "Уравнения".
 - 1.2. Заполнить информационные строки, указав фамилию, номер группы и вариант задания.
 - 1.3. Провести описание блоков расчетной схемы.
 - 1.4. Описать конфигурацию расчетной схемы.
2. Запустить на выполнение файл `gform.bat`.
3. Если имеет место нормальное завершение работы системы генерации и сопровождения имитационной модели, то, предварительно просмотрев информационный файл, направить его на печать.
4. В случае аварийного останова просмотреть информационный файл, ознакомиться с диагностическими сообщениями и уста-

новить ошибку (перечень диагностических сообщений с указанием возможных причин возникновения ошибок и рекомендуемых действий по их устранению приведены в прил. 3 и 4.).

5. Удалить информационный файл.
6. Повторно запустить на выполнение файл `rform.bat` и провести необходимые корректировки файла исходных данных.
7. Провести повторный запуск на выполнение файла `ritm.bat`.

При сравнении уравнений, полученных по формальным алгоритмам и с помощью ЭВМ, необходимо учитывать принятую в вычислительном комплексе систему индексации переменных. Суть системы состоит в том, что используется двойной индекс, который образован из номера блока и через тире локального номера переменной в блоке. Поскольку при получении уравнений на ЭВМ использовались лишь простейшие блоки вычислительного комплекса, схемы замещения которых содержат только одну ветвь, то локальный номер напряжения или тока ветви схемы замещения блока всегда соответствует единице, а номер блока - номеру ветви в первоначальной схеме замещения, для которой по формальным алгоритмам получены уравнения.

5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

5.1. Постановка задачи

При выполнении курсовой работы требуется средствами вычислительного комплекса "РИТМ" провести моделирование переходного процесса в электрической системе, обусловленного возникновением трехфазного короткого замыкания.

Для эквивалентирования электрической системы следует использовать типовой блок `ELT026`. Варианты параметров системы приведены в прил. 2. Для воспроизведения активных потерь в электрической системе может быть использован блок `ELT094`. Возникновение трехфазного короткого замыкания обеспечивается с помощью блока `ELT071`. Расчет переходного процесса следует выполнить для интервала времени от 0.0 до 0.1 с. В качестве момента возникновения короткого замыкания принять 0.04 с.

В результате моделирования переходного процесса требуется получить осциллограммы токов короткого замыкания.

5.2. Подготовка исходных данных

В соответствии с постановкой задачи силовую часть имитационной модели электрической системы образуют блоки `ELT026`, `ELT071` и `ELT094`. Поскольку короткое замыкание возникает не в начальный момент времени и необходимо получить осциллограммы токов короткого замыкания, то имитационную модель электрической системы следует дополнить блоками `ELT014` (осциллограф) и `ELT019` (коммутатор).

Исходные данные для электрической системы, приведенные в прил. 2, содержат значения мощности трехфазного короткого замыкания, номинального напряжения и номинальной частоты системы. В связи с этим необходимо предварительно рассчитать параметры блока `ELT026`: определить амплитуду синусоидальной э.д.с. и индуктивность схемы замещения блока, а также приблизительно установить характерное значение тока короткого замыкания.

Поскольку под номинальным напряжением системы понимается действующее значение линейного напряжения, то амплитуда э.д.с. рассчитывается по формуле

$$E_m = \frac{\sqrt{2} \cdot U_n}{\sqrt{3}}$$

Модуль комплексного сопротивления системы выражается через задаваемые параметры следующим образом:

$$Z = \frac{U_n^2}{S_{кз}}$$

Имея в виду, что

$$Z = \sqrt{r^2 + x^2}$$

и в соответствии с постановкой задачи $r = 0.1 \cdot x$, вычисляем отсюда индуктивное сопротивление системы.

Индуктивность схемы замещения блока рассчитывается по выражению

$$L = \frac{X}{2 * 3.1415926 * f}$$

Максимальное мгновенное значение тока короткого замыкания не может превосходить величины

$$I_{max} = \sqrt{2} \frac{S_{кз}}{3 * U_n} K \approx 2$$

где K - ударный коэффициент, принимающий значение от 1.0 до 2.0.

В качестве характерного значения тока короткого замыкания может быть принято значение тока при K = 2.

В постановке задачи ничего не говорится о начальной фазе напряжений системы, поэтому в качестве начального значения фазы э. д. с. схемы замещения блока фазы А может быть принято любое значение, например, равное нулю.

До короткого замыкания ток в системе не протекал, следовательно, начальные значения токов индуктивностей схемы замещения блока должны быть заданы нулевые.

Активное сопротивление электрической системы, составляющее 10 % от индуктивного сопротивления, задается в данных блока ВЛТ094.

Следующим блоком имитационной модели является трехфазный короткозамыкатель. Поскольку в соответствии с постановкой задачи возникновение короткого замыкания предполагается не в начальный момент времени, то в исходном состоянии ключи схемы замещения блока должны быть разомкнуты и не должны замыкаться до внешнего воздействия, задаваемого коммутатором. Для такого моделирования трехфазного короткозамыкателя его ключи должны иметь недостижимое значение напряжения замыкания, например, десятикратное от номинального напряжения системы.

Блок ВЛТ019 введен в имитационную модель для управления ключами трехфазного короткозамыкателя. В соответствии с условиями задачи короткое замыкание должно возникнуть в момент времени 0.04 с и не устраняться до окончания расчета. Для воспроизведения такого поведения ключей трехфазного короткозамыкателя в мо-

мент времени, равный 0.04 с, из блока ВЛТ019 должна поступить команда на замыкание ключей короткозамыкателя. Причем одновременно с этим должны быть указаны новые критерии коммутации ключей, которые бы не привели к устранению короткого замыкания с первым переходом тока через нулевое значение. (Для обеспечения неустраняемого короткого замыкания для каждого ключа должны быть заданы недостижимые значения тока размыкания, например, равные десятикратным от максимально возможного.)

В соответствии с постановкой задачи следует провести осциллографирование трех токов короткого замыкания. Осциллографирование выполняется с помощью блока ВЛТ014 имитационной модели. В качестве осциллографируемых токов могут быть выбраны либо токи соответствующих ветвей схемы замещения блока ВЛТ026, либо токи ветвей схемы замещения блока ВЛТ094, либо токи ключей схемы замещения блока ВЛТ071. При подготовке данных для блока ВЛТ014 указываются значения осциллографируемых переменных, по которым рассчитываются масштабы. Для более подробного осциллографирования токов короткого замыкания значения, по которым рассчитываются масштабы, не должны сильно отличаться от максимально возможных и могут быть получены в результате округления значения максимально возможного тока.

Далее необходимо произвольным образом пронумеровать блоки имитационной модели и подготовить цифровое описание конфигурации расчетной схемы.

В завершение следует определить значение шага расчета. Допустимыми значениями шага расчета являются значения 1 - 20 градусов периода частоты системы. Шаг расчета должен быть задан в секундах; определяется по формуле

$$h = \frac{H}{360 * f}$$

где H - значение шага расчета в градусах.

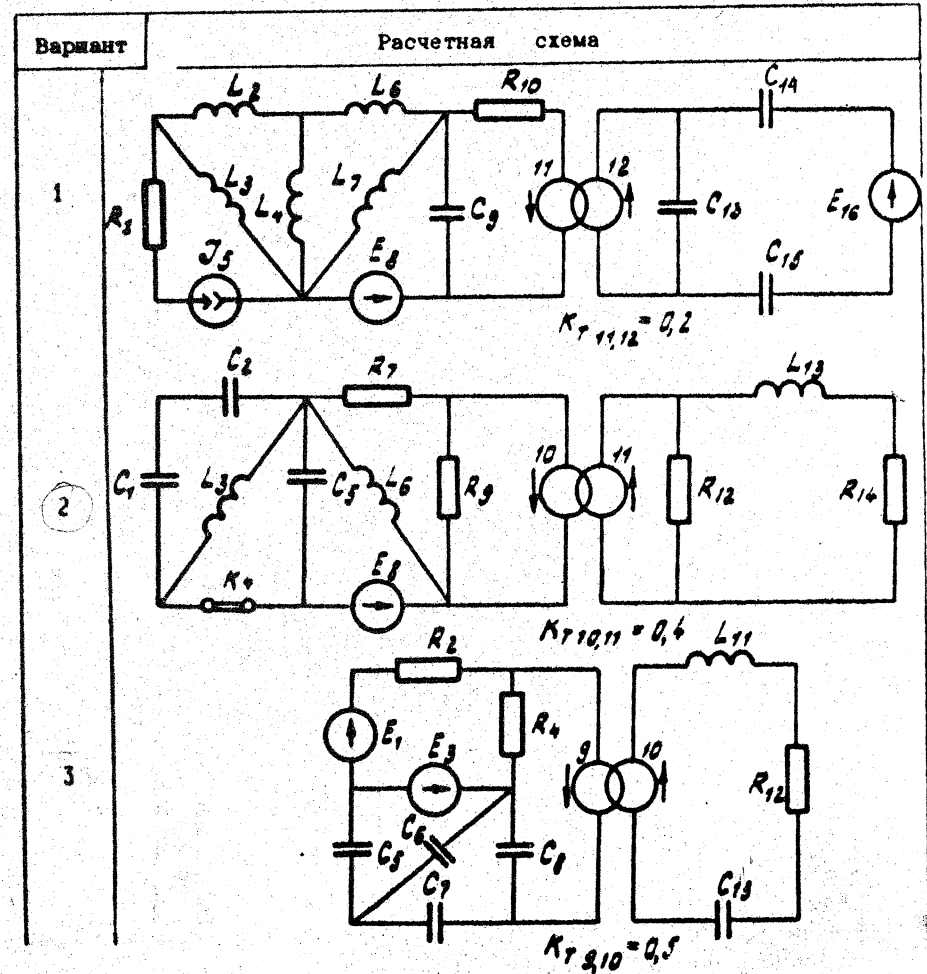
5.3. Порядок моделирования переходного процесса

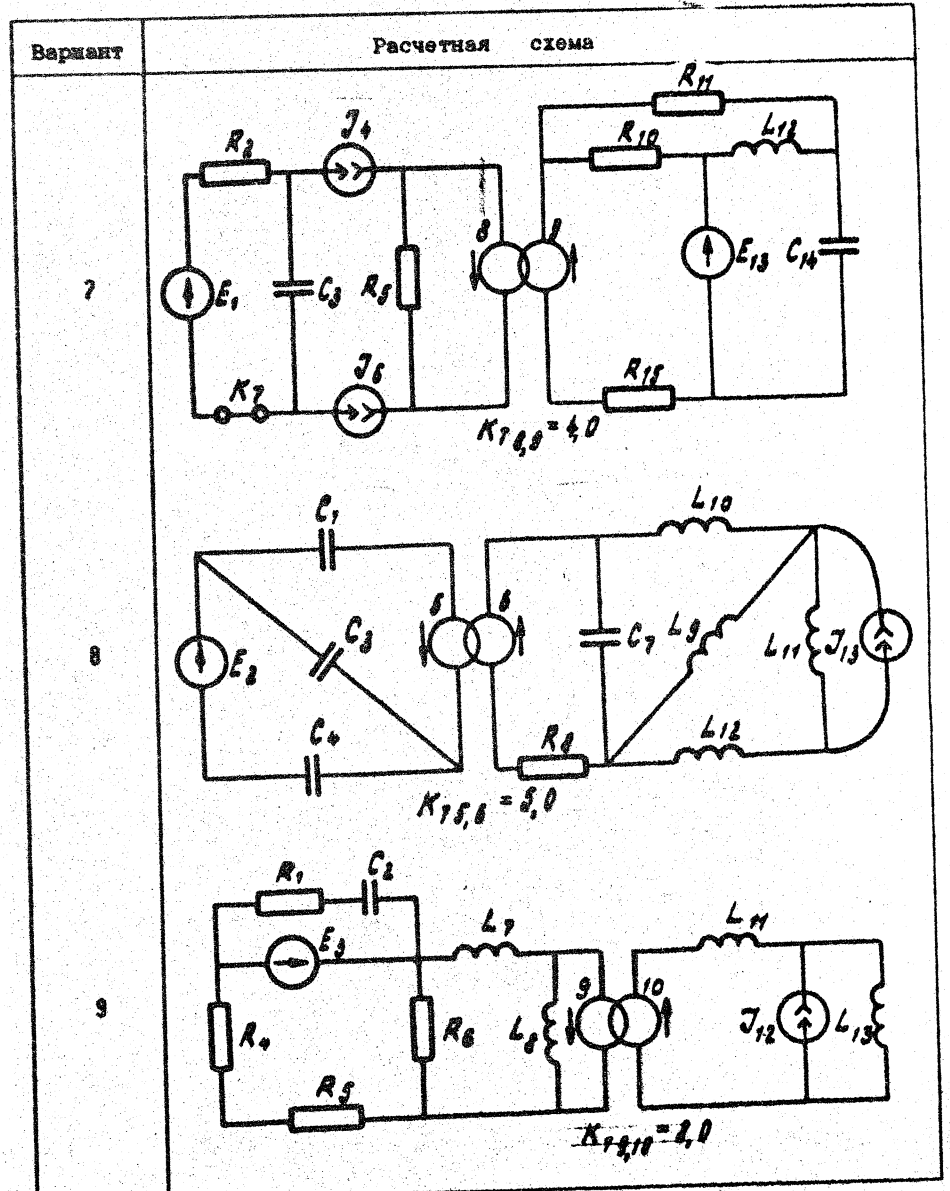
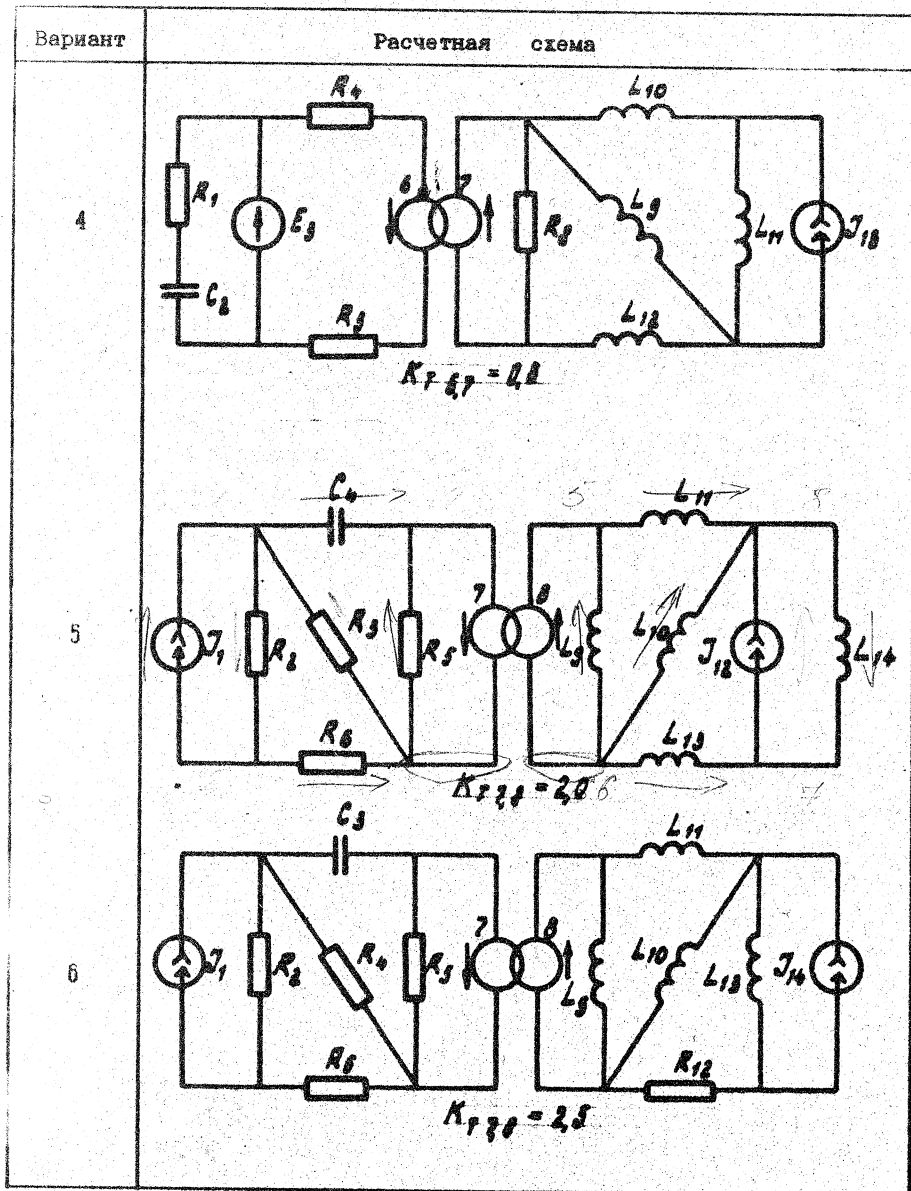
Для моделирования переходного процесса необходимы следующие

действия.

1. Подготовить файл исходных данных, запустив на выполнение из поддиректории бригады **rform.bat**.
 - 1.1. Проверить настройки комплекса и, если необходимо, для настройки "Режим" установить значение "Расчет".
 - 1.2. Заполнить информационные строки, указав имя исполнителя, номер группы и вариант задания.
 - 1.3. Подготовить данные для позиции главного меню "Задание на расчет" (время окончания указать равным 0.1 с, один интервал расчета с шагом, значение которого определено в п. 5.2).
 - 1.4. Провести описание блоков расчетной схемы.
 - 1.5. Описать конфигурацию расчетной схемы.
2. Запустить на выполнение файл **ritm.bat**.
3. В случае аварийного останова просмотреть информационный файл, ознакомиться с диагностическими сообщениями и установить ошибку (перечень диагностических сообщений с указанием возможных причин возникновения ошибок и рекомендуемые действия по их устранению приведены в прил. 3 и 4).
4. Удалить информационный файл.
5. Повторно запустив на выполнение файла **rform.bat**, провести необходимое корректирование файла исходных данных.
6. Провести повторный запуск на выполнение файла **ritm.bat**;
7. При завершении осциллографирования получить печатную копию осциллограмм формата A4 и после окончания расчета распечатать информационный файл.

Варианты расчетных схем
для формирования уравнений переходного процесса

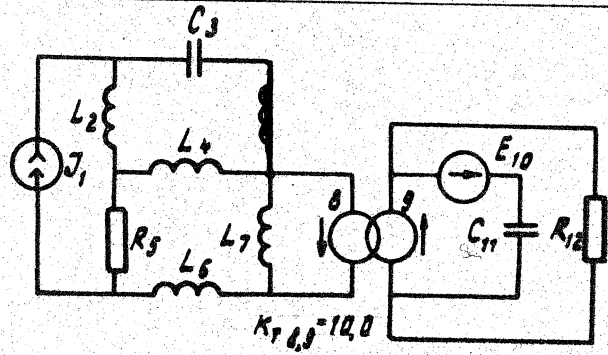




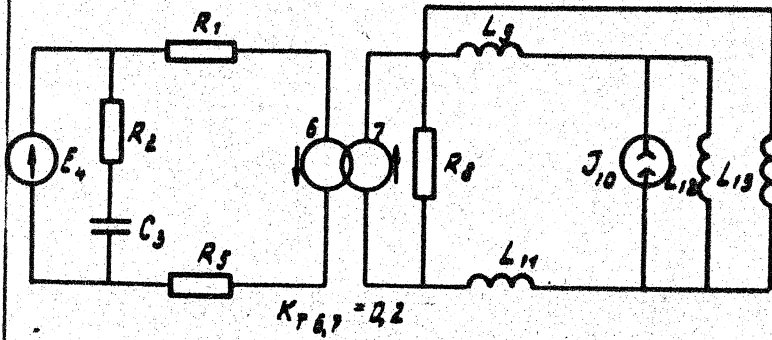
Вариант

Расчетная схема

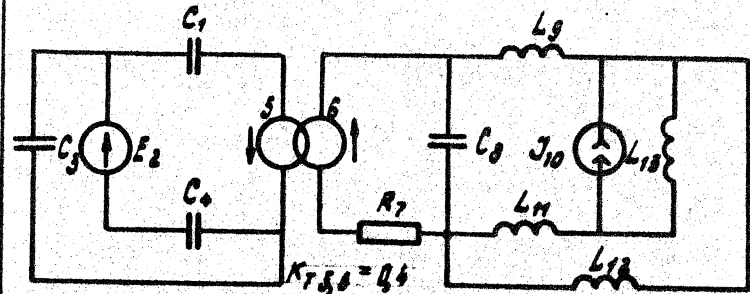
10



11



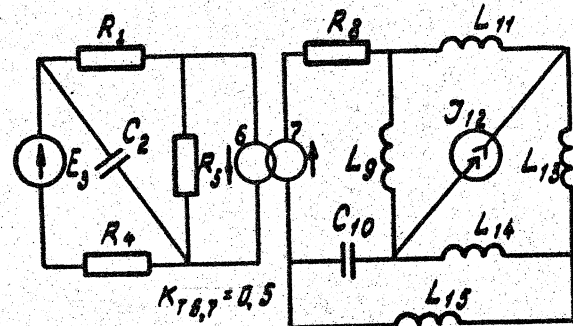
12



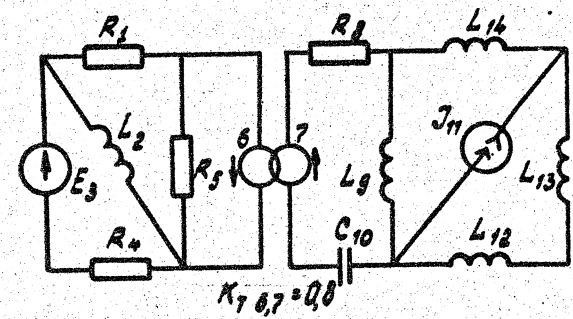
Вариант

Расчетная схема

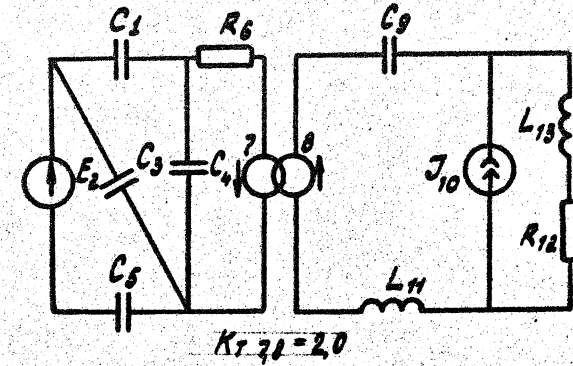
13

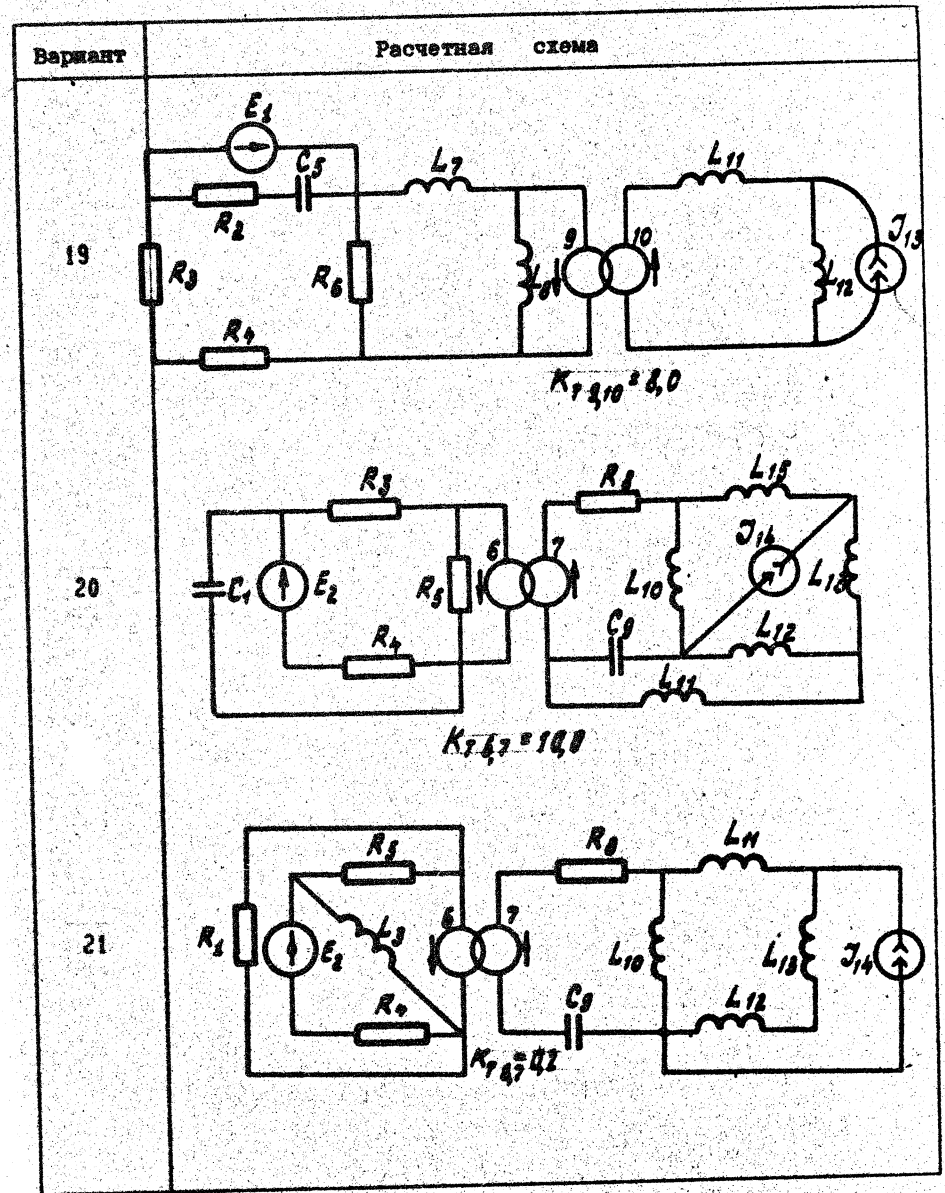
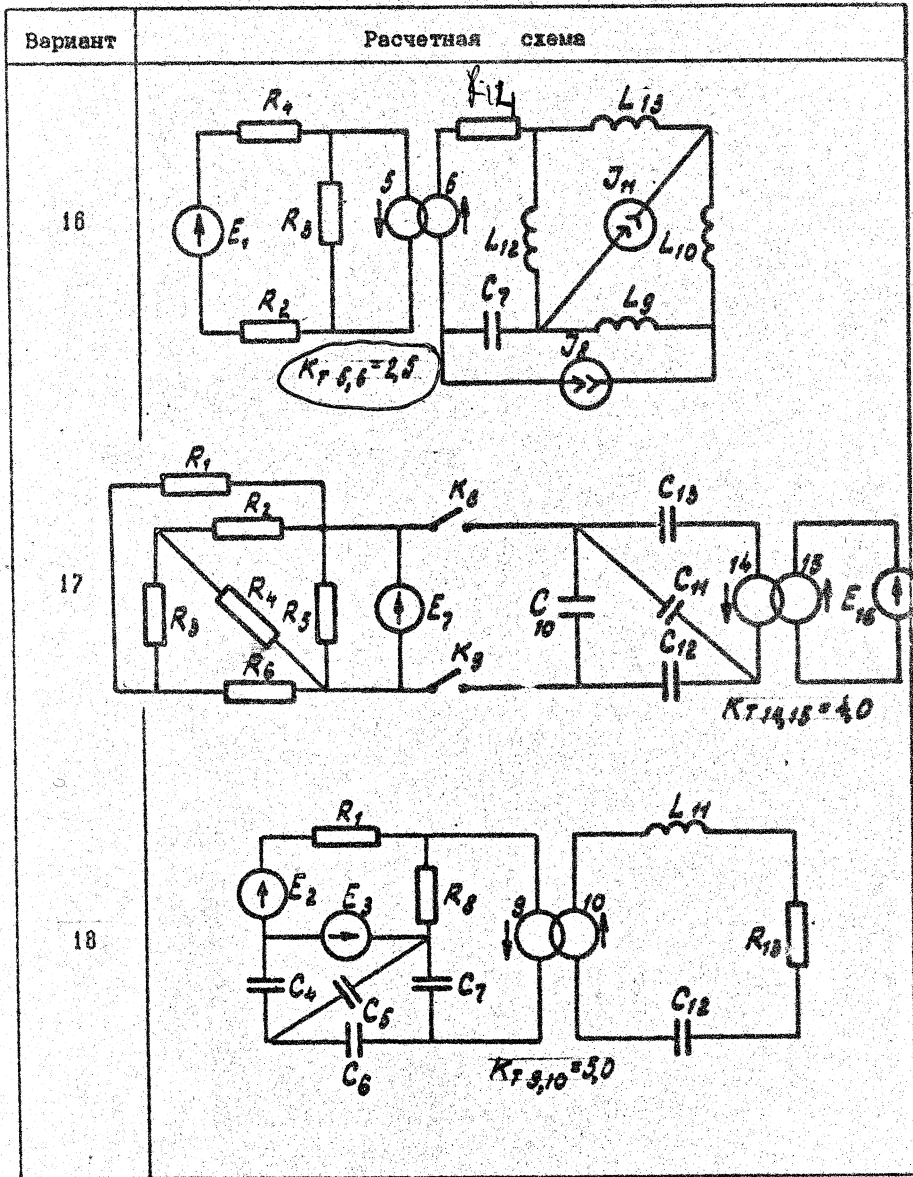


14



15

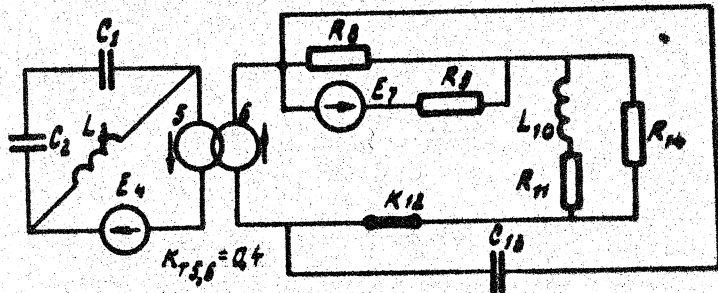




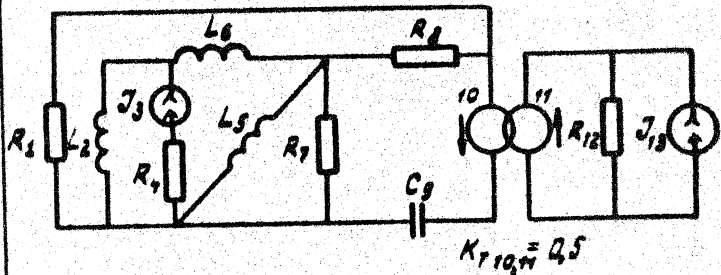
Вариант

Расчетная схема

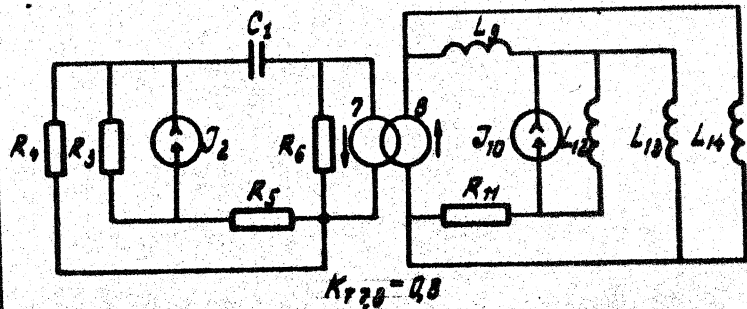
22



23



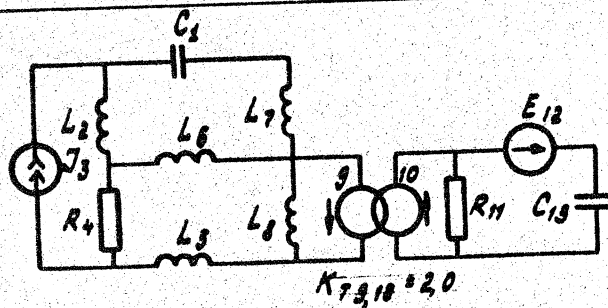
24



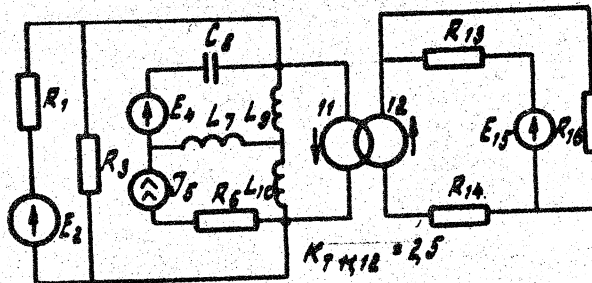
Вариант

Расчетная схема

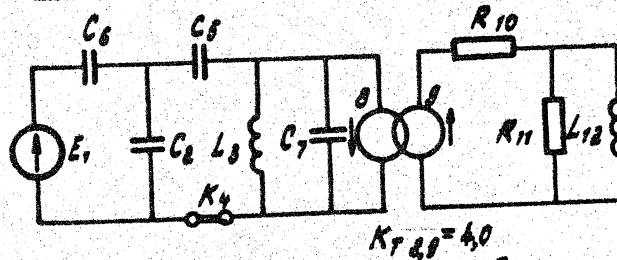
25



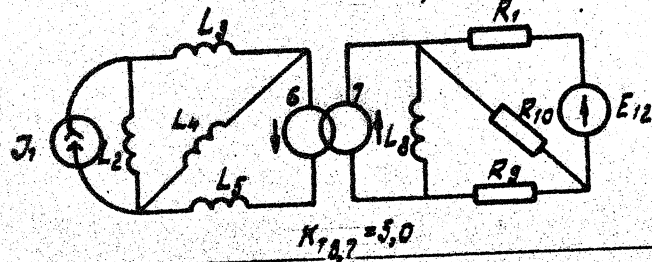
26



27



28

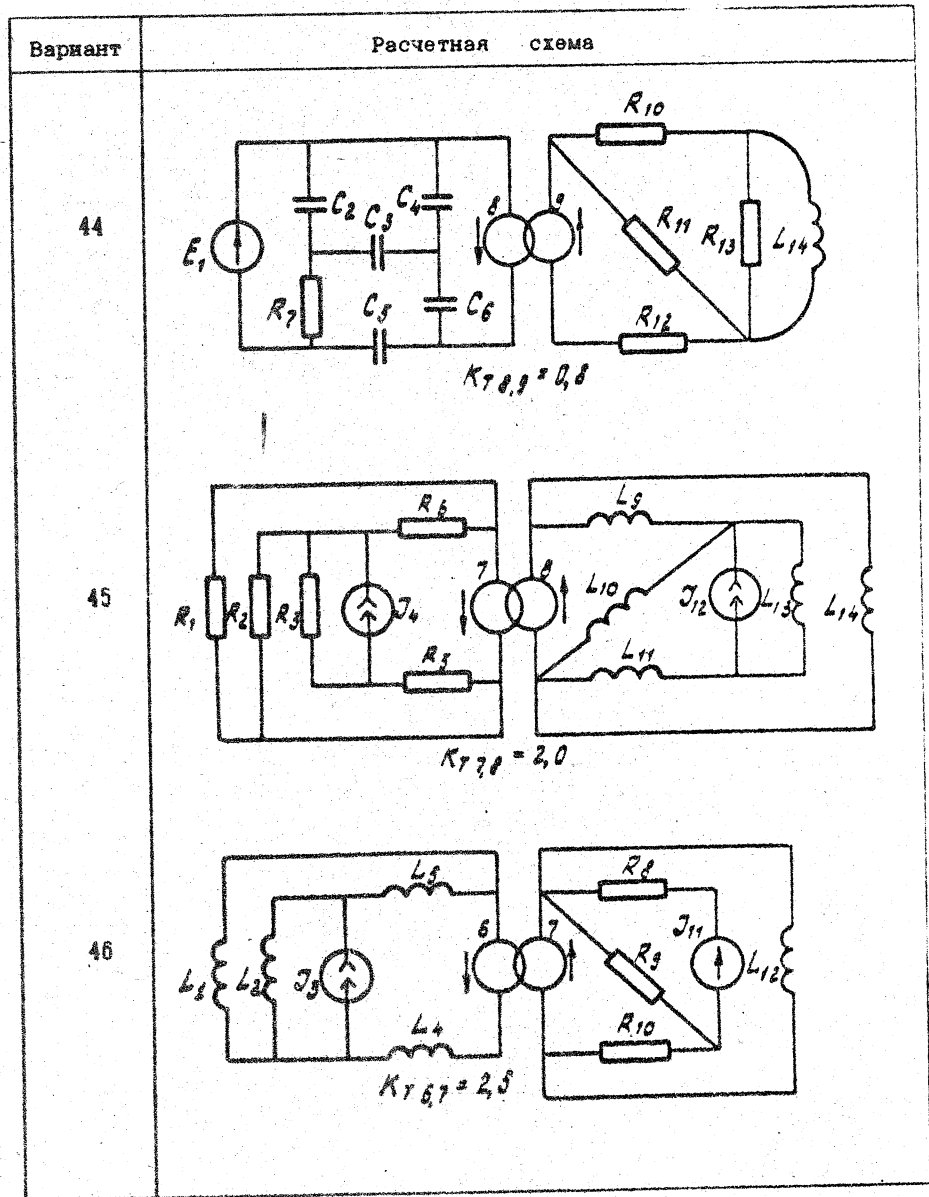
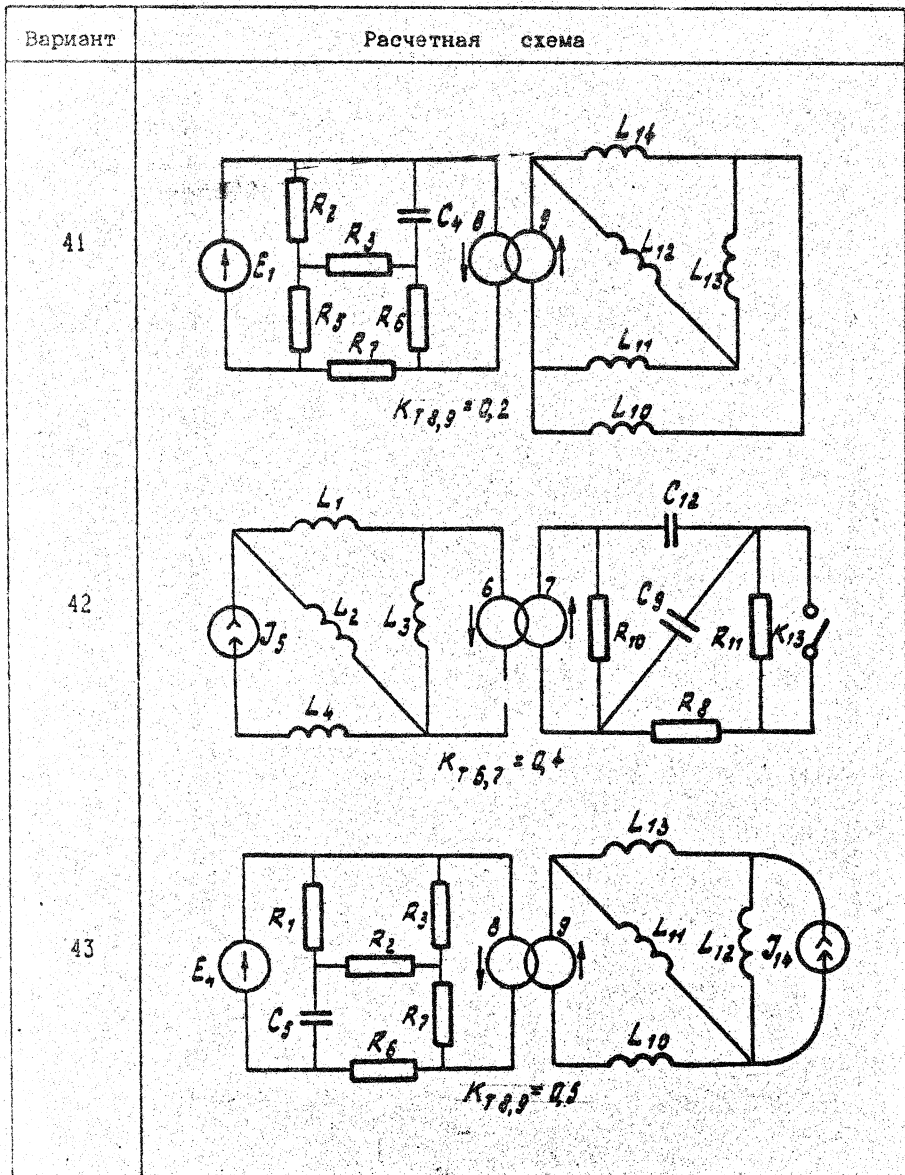


Вариант	Расчетная схема
29	
30	
31	

Вариант	Расчетная схема
32	
33	
34	

Вариант	Расчетная схема
35	<p>$K_{78,9} = 2,0$</p>
36	<p>$K_{710,11} = 2,5$</p>
37	<p>$K_{74,9} = 4,0$</p>

Вариант	Расчетная схема
38	<p>$K_{78,9} = 3,0$</p>
39	<p>$K_{75,6} = 8,0$</p>
40	<p>$K_{78,9} = 10,0$</p>



Вариант	Расчетная схема
47	<p>$K_{10,9} = 4,0$</p>
48	<p>$K_{7,6} = 5,0$</p>
49	<p>$K_{7,8} = 4,0$</p>

Вариант	Расчетная схема
50	<p>$K_{11,15} = 1,90$</p>
51	<p>$K_{11,11} = 4,2$</p>
52	<p>$K_{7,8} = 4,4$</p>

Варианты данных для моделирования короткого замыкания

Un=110 кВ		Un=220 кВ		Un=330 кВ		Un=500 кВ	
№: n/n	Скз, МВА	№: n/n	Скз, МВА	№: n/n	Скз, МВА	№: n/n	Скз, МВА
1	2000	11	7000	21	10000	31	14000
2	2250	12	7250	22	10500	32	14500
3	2500	13	7500	23	11000	33	15000
4	2750	14	7750	24	11500	34	15500
5	3000	15	8000	25	12000	35	16000
6	3250	16	8250	26	12500	36	16500
7	3500	17	8500	27	13000	37	17000
8	3750	18	8750	28	13500	38	17500
9	4000	19	9000	29	14000	39	18000
10	4250	20	9250	30	14500	40	18500

Номинальная частота систем 50 Гц.

Активное сопротивление для каждой системы принять равным 10 % от индуктивного.

Сообщения встроенной системы диагностики на этапе ввода данных

D1D011 - запрошенный метод интегрирования недоступен.

Причина: версия вычислительного комплекса не поддерживает указанный метод численного интегрирования дифференциальных уравнений.

Рекомендация. Допустимые методы:

- Хэмминга с постоянным шагом;
- Рунге-Кутта с постоянным шагом;
- Хойна;
- трапеции;
- Хэмминга с переменным шагом.

Указание метода интегрирования производится в группе данных "Настройка комплекса".

D1D013 - дискретные модели недоступны.

Причина: запрошены дискретные модели элементов.

Рекомендация. Изменить тип математических моделей элементов. Указание типа математических моделей элементов производится в группе данных "Настройка комплекса".

D1D014 - ошибка в описании временных границ расчета.

Причина: не соблюдены условия описания временных границ расчета.

Границы расчета должны удовлетворять следующим условиям:

- обе границы не могут быть отрицательными (если задано отрицательное значение схемного времени начала расчета, то оно авто-

матически принимается равным нулю);
- схемное время начала расчета должно быть меньше схемного времени его окончания (в режиме "Формирование уравнений" контроль не производится).

Рекомендация. Указание момента начала и момента окончания расчета производится в группе данных "Задание на расчет".

DIDO15 - ошибка в описании интервала расчета: T1 = XXX, T2 = YYY, H = ZZZ.

- Причины:
1. Длительность интервала (разность между схемным временем окончания интервала и схемным временем начала интервала) не может быть менее шага расчета на этом интервале.
 2. Левая граница интервала не может быть отрицательной.
 3. Правая граница интервала и шаг не могут быть неположительными.

Рекомендация. Изменить описание интервала расчета. Указание границ интервалов расчета и шага производится в группе данных "Задание на расчет".

DIDO18 - недопустимое значение погрешности расчета.

Причина: задано недопустимое значение погрешности расчета.

Рекомендация. Изменить значение погрешности расчета. Значение погрешности расчета должно быть более нуля и менее 100 %. Значение погрешности расчета задается в группе данных "Задание на расчет" (в режиме "Формирование уравнений" контроль не производится).

DIDO19 - недопустимая длительность интервала одновременности событий.

Причина: задано неположительное значение интервала одновременности событий. Интервал одновременности событий задает допустимую погрешность в определении моментов коммутации ключевых элементов и моментов генерации управляющих импульсов, позволяющую считать их одновременными.

Рекомендация. Интервал одновременности событий целесообразно задавать положительным, но не более шага расчета.

Указание значения интервала одновременности производится в группе данных "Задание на расчет".

DIDO24 - недопустимый идентификатор полюса NNN в описании структуры электрической схемы.

Причина: составной идентификатор NNN указан меньше минимально допустимого или больше максимально допустимого.

Рекомендация. Минимальное допустимое значение составного идентификатора в описании структуры расчетной схемы принято равным 101, а максимальное допустимое - 32000.

DIDO28 - номер MMM блока превысил допустимое значение NNN.

- Рекомендации:
1. Изменить номер указанного блока. Изменение номера блока производится путем его исключения из данных и последующего ввода с новым номером. При наличии у него схемных полюсов необходимо произвести соответствующие изменения в описании структуры.
 2. При отсутствии неиспользуемого номера из числа допустимых следует изменить схему путем

введения укрупненных типовых блоков.

D1D029 - описание блока NNN уже произведено.

Причина: в исходных данных содержится более одного блока с номером NNN.

Рекомендация. Проверить нумерацию блоков.

D1D035 - превышен MAM допустимый ресурс NNN числа глобальных переменных модели.

Причина: при вводе данных очередного блока зафиксировано превышение допустимого числа глобальных переменных модели.

Рекомендация. Для уменьшения числа глобальных переменных можно применить следующие способы:

- отказаться от использования расширенного состава переменных в блоках;
- сократить объем имитационной модели;
- использовать типовые блоки с меньшим числом локальных переменных.

D1D037 - не указан узел подключения полюса MAM блока NNN.

Причина: каждый типовой блок имеет фиксированное число внешних полюсов, составные идентификаторы которых обязательно должны содержаться в описании структуры расчетной схемы.

Рекомендация. Проверить корректность описания структуры.

D1D038 - превышен MAM допустимый размер NNN таблицы значений шага расчета.

Причина: превышено допустимое в данной версии число последовательных интервалов расчета.

Рекомендация. Уменьшить число интервалов расчета. Задание интервалов расчета производится в группе данных "Задание на расчет".

D1D040 - не найден блок NNN.

Причина: в данных одного из блоков указан идентификатор внешней переменной, принадлежащей блоку NNN, однако описание блока NNN отсутствует в исходных данных.

Рекомендации. 1. Если описание блока NNN ошибочно пропущено, то дополнить исходные данные.
2. Проверить корректность задания внешних идентификаторов в других блоках модели.

D1D041 - переменная NNN - MAM не является глобальной.

Причина: в данных одного из блоков указан идентификатор недоступной внешней переменной MAM блока NNN.

Рекомендация. Ошибка возможна, если:

- при подготовке данных для одного из блоков модели допущена ошибка при указании идентификатора внешней переменной;
- исходными данными блока NNN ограничен доступ к локальной переменной MAM (например, задан номинальный состав переменных блока, а данная локальная переменная доступна только при расширенном составе переменных блока).

D1D043 - блок NNN имеет только MAM полюсов.

Причина: при обработке блока NNN обнаружено, что описание структуры электрической системы содержит идентификатор полюса, недопустимый для данного блока. Ошибка возникает, если:

- в описании структуры расчетной схемы для

идентификатора одного из полюсов блока NNN использован номер полюса, превышающий MMM; - неправильно указан номер блока в составном идентификаторе полюса.

Рекомендация. Проверить описание структуры расчетной схемы.

DIDO44 - некорректные исходные данные блока NNN, код ошибки MMM.

Причина: при вводе исходных данных блока NNN зафиксирована их некорректность.

Рекомендация. Подробная информация о характере ошибок, выявленных при диагностике данных блока этого типа, содержится в разделе Руководства, посвященном описанию блока. Код MMM является локальным кодом ошибки и расшифровывается при описании блока.

DIDO45 - отсутствует описание данных блока NNN.

Причина: при задании структуры расчетной схемы указан составной идентификатор полюса блока NNN, описание которого не проведено.

Рекомендации. 1. Подготовить данные для блока NNN.
2. Проверить описание структуры расчетной схемы.

DIDO48 - для интегрируемой переменной NNN - MMM задано недопустимое характерное значение RRR.

Причина: задано недопустимое характерное значение для одной из интегрируемых переменных блока NNN.

Рекомендация. Характерное значение должно быть положительным.

DIDO49 - ошибка в описании структуры расчетной схемы.

Причина: неопознанная ошибка в описании структуры расчетной схемы, выявленная на стадии заключительного контроля исходных данных.

Рекомендации. 1. Тщательно проверить описание структуры расчетной схемы.
2. Если использовались процедуры, реализующие пользовательский программный интерфейс, то проверить описание схемы замещения блока, программируемого пользователем.
3. Обратиться к разработчикам комплекса.

DIDO68 - аварийный останов при адресации элемента N1-NNN, N2-MMM, J-LLL.

Причина: на этапе генерации имитационной модели обнаружена некорректность обрабатываемой структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы.

Рекомендации. 1. Проверить корректность описания структуры расчетной схемы.
2. Ошибка возможна при использовании процедур, реализующих пользовательский программный интерфейс. Если такой интерфейс не используется, то необходимо обратиться к разработчикам комплекса.

Сообщения встроенной системы диагностики на этапе расчета

DDK001 - аварийный выход из программы интегрирования.

Причина: при численном интегрировании дифференциальных уравнений на очередном интервале расчета обнаружено либо отрицательное значение шага расчета, либо время начала интервала превышает время его окончания.

Рекомендация. Обратиться к разработчикам комплекса.

DDK002 - необходимо уменьшить шаг расчета.

Причина: в процессе численного интегрирования обнаружено, что не обеспечивается заданная точность расчета при текущем значении шага численного интегрирования.

Рекомендации. 1. Использовать метод численного интегрирования более высокого порядка. Указание метода интегрирования производится в группе данных "Настройка комплекса".
2. По возможности использовать метод интегрирования с переменным шагом. Указание метода интегрирования производится в группе данных "Настройка комплекса".
3. Уменьшить значение шага численного интегрирования на данном интервале расчета. Указание значения шага производится в группе данных "Задание на расчет".
4. Уточнить характерные значения для интегрируемых переменных, задав их примерно равными фактическим максимальным значениям в ходе данного процесса.
5. По возможности увеличить значение допусти-

мой погрешности расчета. Указание погрешности производится в группе данных "Задание на расчет".

DDK009 - схемное время T-RRR.
Неустойчивое состояние ключей.

Причина: зафиксировано более 20 изменений структуры расчетной схемы вследствие коммутации ключей без изменения схемного времени.

Рекомендации. 1. Проверить корректность заданных критериев коммутации ключей.
2. Уменьшить значение шага расчета на данном интервале. Указание значения шага расчета производится в группе данных "Задание на расчет".
3. Использовать метод численного интегрирования более высокого порядка. Указание метода интегрирования производится в группе данных "Настройка комплекса".
4. Установить значение "интерполирование" для опции "Определение начальных условий". Указание значения опции производится в группе данных "Настройка комплекса".
5. Увеличить абсолютные значения токов отключения для соответствующих ключей, устанавливаемых по протоколам коммутаций.
6. Увеличить значения напряжений замыкания для соответствующих ключей, устанавливаемых по протоколам коммутаций.

DDK020 - невозможно факторизовать матрицу алгебраической системы.

Причина: при очередной факторизации матрицы алгебраической системы зафиксирован ведущий элемент со значением ниже допустимого (0.000001).

Рекомендация. Проверить задание параметров блоков имитационной модели.

О Г Л А В Л Е Н И Е

ВВЕДЕНИЕ..... 3

1. ПРОГРАММА КУРСОВОЙ РАБОТЫ..... 4

2. ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ПОЛУЧЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА.. 5

2.1. Общие положения..... 5

2.2. Цифровое описание расчетной схемы..... 6

2.3. Основные определения алгебры структурных ориентированных чисел..... 8

2.4. Определение компонент орграфа и получение избыточного цифрового описания конфигурации расчетной схемы.....II

2.5. Цифровое описание структуры токов и напряжений ветвей расчетной схемы.....13

2.6. Цифровое описание структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы.....14

2.7. Алгоритмы получения характеристик матрица структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы.....14

2.8. Неособые и особые ветви базы и кобазы.....17

2.9. Формирование уравнений переходных процессов.....18

2.9.1. Формирование уравнений для определения напряжений ветвей базы и токов ветвей кобазы.....18

2.9.2. Формирование уравнений для определения токов ветвей базы и напряжений ветвей кобазы.....23

2.9.3. Формирование дифференциальных уравнений.....23

2.10. Пример формализованного получения уравнений переходного процесса.....23

2.10.1. Цифровое описание расчетной схемы.....25

2.10.2. Определение компонент орграфа и получение избыточного цифрового описания конфигурации расчетной схемы.....26

2.10.3. Получение цифрового описания структуры токов и напряжений ветвей расчетной схемы.....29

2.10.4. Получение цифрового описания структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы.....30

2.10.5. Получение характеристик матрица структуры токов и напряжений основных ветвей расчетной схемы.....31

2.10.6. Выявление неособых и особых ветвей базы и кобазы..35

2.10.7. Формирование уравнений для определения напряжений ветвей базы и токов ветвей кобазы.....36

2.10.8. Формирование уравнений для определения токов ветвей базы и напряжений ветвей кобазы.....40

2.10.9. Формирование дифференциальных уравнений.....42

3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС "РИТМ"..... 43

3.1. Общие сведения.....43

3.2. Состав исходной информации.....44

3.3. Типовые блоки комплекса.....45

3.4. Описание конфигурации расчетной схемы.....49

3.5. Система подготовки и корректирования файлов исходных данных.....50

3.5.1. Запуск системы.....50

3.5.2. Главное меню системы.....51

3.5.3. Позиция Главного меню "Настройка комплекса".....51

3.5.4. Позиция Главного меню "Задание на расчет".....52

3.5.5. Позиция Главного меню "Описание блоков".....54

3.5.5.1. Позиция подменю "Ввод данных блоков".....55

3.5.5.2. Позиция подменю "Корректирование данных блоков".....57

3.5.5.3. Позиция подменю "Копирование блока ".....58

3.5.5.4. Позиция подменю "Сводка блоков".....58

3.5.5.5. Позиция подменю "Исключение блока".....58

3.5.6. Позиция Главного меню "Описание структуры".....58

3.5.7. Резервный файл исходных данных.....60

3.6. Система генерации и сопровождения имитационной модели...60

3.6.1. Запуск системы.....60

3.6.2. Просмотр, удаление и печать информационного файла..61

3.6.3. Осциллографирование переменных переходного процесса.....62

4. ПОЛУЧЕНИЕ УРАВНЕНИЙ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА НА ЭВМ.....	62
4.1. Цифровое описание конфигурации расчетной схемы.....	62
4.2. Порядок получения уравнений.....	65
5. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА.....	66
5.1. Постановка задачи.....	66
5.2. Подготовка исходных данных.....	67
5.3. Порядок моделирования переходного процесса.....	69
ПРИЛОЖЕНИЯ	
1. Варианты расчетных схем для формирования уравнений переходного процесса.....	71
2. Варианты данных для моделирования короткого замыкания.....	88
3. Сообщения встроенной системы диагностики на этапе ввода данных.....	89
4. Сообщения встроенной системы диагностики на этапе расчета.....	96

ЗЕЛЕНЕВСКИЙ Дмитрий Евгеньевич
КОРОТКОВ Борис Александрович
ПОПКОВ Евгений Николаевич

Автоматизация формирования уравнений
переходных процессов в электрических системах

Редактор Н.В. Бакк
Св. тем. план 1995 г.

Лицензия ЛР № 020593 от 09.07.92.
Подписано к печати 22.12.95. Формат 60.84/16. Бумага тип. № 3.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,25 Уч.-изд. л. 6,25
Тираж 120. Заказ 5 С 276.

Санкт-Петербургский государственный технический университет.
Издательско-полиграфический центр СПбГТУ.
Адрес университета и ИЦ: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29.