Министерство энергетики и электрификации СССР
ГЛАВНИИПРОЕКТ
Сибирский научно-исследовательский
институт энергетики
(СибНИИЭ)

УДК 621.311.1:681.3.06

Государственная
регистрация № 81089116

Инв. № 02814 009723

Отчет одобрен Ученым Советом
Ученый секретарь
к. т. н. Макаров В.М.
3 июня 1981 г.

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор института
к. т. н. Бушуев В.В.
1981 г.

Отдел ограничения ТКЗ

ОТЧЕТ
заключительный

по теме: Разработать технико-экономическое решение по повышению надежности и устойчивости ЕЭС СССР

Работа: КОМПЛЕКС ПРОГРАММ МАЭС ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СХЕМАХ

ШИФР ПРОБЛЕМЫ 0.Ц.003 ШИФР ТЕМЫ 0СI06Ц0502

Зав. отделом к.т.н. Б.И.Ковалев
Рук. НИР м.н.с. И.Е.Наумкин
Отв. исполн. м.н.с. А.А.Челазнов

«__» _____ 198_ г.

Новосибирск, 1981 г.

Полиграфобъединение «Рассвет», 1981 г., Зак. № 1961 - 1000

Исполнители:

Наумкин И.Е., мл.н.с. (I; 2; 3.I; 3.2; 3.3; 3.4; 3.5; 3.6.I; 3.6.3; 3.7.I; 3.7.2; 3.7.4; 3.7.6; 3.9; 4.I; 4.3; 4.4; 4.5.2; 4.5.3; 4.5.4; 5)

Челазнов А.А., мл.н.с. (I; 3.6.2; 3.7.5; 3.7.7; 3.8; 4.I; 4.2; 4.5.I; 4.5.5; 5)

РЕФЕРАТ

Стр. 201 рис. 85

Ключевые слова: комплекс программ, переходные электромагнитные процессы, электроэнергетические схемы, ФОРТРАН, перенапряжения, переходные токи к.з. , восстанавливающиеся напряжения, многоразрывный выключатель, процесс дугогашения, сосредоточенные параметры, многопроводные линии, БЭСМ-6, ЕС ЭВМ.

Описаны принципы комплекса программ МАЭС для расчета переходных электромагнитных процессов в сложных электроэнергетических схемах.

Представлены подпрограммы на языке ФОРТРАН, предназначенные для проведения расчетов перенапряжений, переходных токов короткого замыкания, а также восстанавливающихся напряжений на контактах выключателей. Разработаны подпрограммы, позволяющие производить расчеты отключения многоразрывного выключателя с учетом процесса дугогашения. Расчеты можно проводить для произвольных линейных и нелинейных схем с сосредоточенными параметрами и для схем, содержащих многопроводные линии.

Приведены примеры расчета перенапряжений, переходных токов к.з., восстанавливающихся напряжений на контактах выключателя и отключения выключателя с учетом процесса дугогашения.

Комплекс программ МАЭС может быть использован при расчетах на машинах БЭСМ-6 и ЕС ЭВМ.

Представленные программы рекомендуются для использования в проектных и научно-исследовательских организациях, занимающихся проектированием энергосистем, разработкой и испытанием выключателей высокого напряжения.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

I. ВВЕДЕНИЕ. 9

2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ МАЭС . 12

2.I. Методологические основы. 12

2.2. Численные методы решения 13

2.3. Принципы организации анализа схем. 16

2.4. Кодирование схемы 17

2.5. Программная реализация моделей элементов . 18

3. ПРОГРАММЫ КОМПЛЕКСА МАЭС 20

3.I. Подпрограммы анализа и сервисные подпрограммы при расчете с "плотной" матрицей и постоянным шагом. 20

3.I.I. Постоянный шаг. 20

3.I.2. Итерационный счет 22

3.I.3. Сервисные подпрограммы. 24

3.I.4. Подпрограммы анализа. 26

3.I.5. Главная подпрограмма и подпрограмма схемы. 28

3.2. Подпрограммы анализа и сервисные подпрограммы при расчете с полной и "плотной" матрицей и переменным шагом. 29

3.2.I. Общие сведения. 29

3.2.2. Подпрограмма для расчета с автоматическим выбором шага и постоянным шагом. 30

3.2.3. Подпрограмма для расчета с кусочно-постоянным шагом. 31

3.2.4. Сервисные подпрограммы. 32

3.2.5. Подпрограммы анализа. 34
3.2.6. Главная подпрограмма при расчете с автоматическим выбором шага и при расчете с полной матрицей. 38
3.2.7. Интерпретация результатов расчета . . . 42
3.2.8. Анализ ошибок. 42
3.3. Подпрограммы моделей активных элементов. . . . 44
3.3.1. Постоянная э.д.с. – THEM EC 44
3.3.2. Синусоидальная э.д.с. – THEM ES 44
3.3.3. Синусоидальный источник тока – THEM IS . . . 45
3.3.4. Э.д.с. с произвольным изменением во времени – THEM ET 45
3.3.5. Э.д.с. с активным сопротивлением THEMER . . . 47
3.3.6. Блок–однофазный генератор–трансформатор THEM EL 48
3.3.7. Блок–трехфазный генератор–трансформатор THEM E3 48
3.4. Подпрограммы моделей пассивных элементов . . . 51
3.4.1. Линейный резистор – THEM RC 51
3.4.2. Резистор с изменяющейся величиной сопротивления во времени – THEM RT 51
3.4.3. Нелинейный резистор, управляемый падением напряжения – THEM RU , THEM RN . . . 52
3.4.4. Линейная индуктивность – THEM LC, THEM L2 . . . 54
3.4.5. Линейная емкость – THEM CC, THEM C2 . . . 55
3.4.6. Активно–индуктивная цепь – THEM LR . . . 55
3.4.7. Идеальный трансформатор– THEM TK, THEMLX . . . 57
3.5. Подпрограммы коммутационных элементов. 58
3.5.1. Отключение в заданный момент времени THEM KB 58

3.5.2. Включение в заданный момент времени – THEM KI 58
3.5.3. Отключение при переходе тока через нуль (идеальный выключатель) – THEM KI. . 60
3.5.4. Включение при превышении разности напряжений заданной величины (искровой промежуток) – THEM KU 61
3.6. Подпрограммы преобразователей систем координат . . . 61 59
3.6.1. Преобразователь фазных координат в модальные (α, β, 0) – THEM FM . . . 61 59
3.6.2. Преобразователь фазных координат во вращающиеся (α, q, 0) – THEM FD . . . 63 61
3.6.3. Преобразователь общего вида на N координат – THEM FN 64 62
3.7. Моделирование многопроводных линий электропередачи. 65
3.7.1. Общие замечания. 65
3.7.2. Математическая модель. 66
3.7.3. Подпрограммы расчета первичных и волновых параметров многопроводных воздушных линий. 67
3.7.4. Одноканальная линий – THEM L1. 77
3.7.5. Одноканальная линия с учетом поверхностного эффекта 84
3.7.6. Трехфазная симметричная линия. 89
3.7.7. Подпрограмма установления режима в длинной линии – THEM YR 99
3.8. Моделирование синхронных генераторов 102
3.8.1. Модель генератора по уравнениям Парка–Горева – THEM PG 102

3.8.2. Подпрограмма упрощенного моделирования генератора – THEM GD 112
3.9. Моделирование процесса дугогашения в высоковольтных газонапорных выключателях. 113
3.9.1. Математическая модель дуги отключения . . . 113
3.9.2. Высоковольтный газонапорный выключатель с учетом процесса дугогашения – THEM AR 116
4. ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ МАЗС 119
4.1. Расчет перенапряжений. 119
4.1.1. Расчет перенапряжений при возникновении к.з. на линии. 119
4.1.2. Расчет переходного процесса при возникновении однофазного короткого замыкания на линии и отключении линии выключателем. 119
4.1.3. Расчет переходных процессов, вызванных последовательностью коммутаций (цикл ОАПВ) 129
4.2. Расчет переходных токов к.з.. 134
4.2.1. Короткое замыкание на шинах генератора. 134
4.2.2. Короткое замыкание на шинах энергоузла 138
4.3. Расчет восстанавливающихся напряжений (ВН) на контактах выключателя. 146
4.3.1. Расчет ВН в испытательной схеме . . . 146
4.3.2. Расчет ВН в энергосистеме 154
4.3.3. Расчет ВН на контактах выключателя, отключающего однофазное к.з. в воздушной линии с тросами. 162

4.4. Расчет дуговых процессов при отключении высоковольтных газовых выключателей. 168
4.4.1. Расчет осциллограммы тока дуги отключения при испытании выключателя 168
4.4.2. Отключение многоразрывным выключателем тока к.з. с учетом явления дугогашения . . . 171
4.5. Некоторые приемы, применяемые при расчетах. . . 175
4.5.1. Вывод на печать значений напряжения в промежуточных точках линии. 175
4.5.2. Методика расчета схем, содержащих длинные линии, по подсхемам. 178
4.5.3. Продолжение расчета переходного процесса с запоминанием промежуточных результатов на МЛ. 185
4.5.4. Линеаризация схем, содержащих нелинейные сопротивления. 186
4.5.5. Вывод на режим путем искусственного увеличения активных потерь в линии 194
5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. . . . . .
Литература . . . . . .
ПРИЛОЖЕНИЕ. Распечатки подпрограмм. . . . . .

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современных энергетических систем характеризуется неуклонным ростом единичных мощностей агрегатов, установленных мощностей электростанций, объединением энергосистем и ростом номинальных напряжений сетей.

Увеличение единичных мощностей генераторов, трансформаторов, выключателей и другого силового оборудования, повышение его номинального напряжения связано с переходом к высоким значениям напряженности электрических и магнитных полей, повышением давления газа в выключателях, использованием сверхнизких температур и т.д. Поэтому для современной аппаратуры характерна тенденция снижения коэффициентов запаса по воздействующим напряжениям, токам и механическим усилиям.

Это обстоятельство заставляет предъявлять повышенные требования к точности определения коммутационных перенапряжений и токов короткого замыкания, которые являются определяющими при оценке работоспособности современного электрического оборудования.

Наиболее достоверными являются результаты, полученные путем непосредственного измерения в реальных энергосистемах. Однако сложность проведения этих измерений в необходимом объеме и невозможность определения воздействий в проектируемых системах выдвигают на первый план расчеты на ЭВМ.

Эффективность использования ЭВМ во многом определяется возможностями программ, предназначенных для проведения расчетов. Разработкой специализированных комплексов программ для расчета переходных электромагнитных процессов в настоящее время занимаются в ЛПИ, ЭНИИЭ, ВГПИ и НИИ Энергосетьпроект, АзНИИЭ, СибНИИЭ и др. организациях.

В данной работе представлено описание комплекса программ МАЭС на языке ФОРТРАН для машин БЭСМ-6 и ЕС. В отличие от большинства специализированных программ, обладающих ограниченными возможностями, комплекс МАЭС позволяет в строгой математической постановке вести расчеты электромагнитных переходных процессов в схемах произвольной сложности и конфигурации. Современный принцип построения комплекса, высокая степень автоматизации процессов подготовки решения и оформления его результатов, отсутствие жестких ограничений на объем и вид элементов расчетных схем позволяют рассматривать его как унифицированный вычислительный аппарат для решения вопросов грозозащиты, защиты от внутренних перенапряжений, ограничения ударных токов к.з., разработки мер повышения отключающей способности выключателей и т.д.

Комплекс программ МАЭС является результатом работы СибНИИЭ и НИИПММ при ТГУ (г.Томск). Математические принципы анализа больших физических систем и их программная реализация, представленная в 2; 3.1; 3.2 выполнены под руководством к.ф.-м.н. Арайса Е.А. (НИИ ПММ). В СибНИИЭ были разработаны принципы расчета многофазных цепей и цепей, содержащих длинные линии, а также составлены подпрограммы моделей элементов электроэнергетических схем.

Большую помощь по программированию на начальном этапе разработки комплекса МАЭС оказал ст.н.с. НИИ ПММ Шадрин В.Ф. При его участии были составлены подпрограммы, описанные в 3.3 и 3.4.

В комплекс программ МАЭС входят подпрограммы анализа, сервисные подпрограммы и подпрограммы моделей элементов электроэнергетических схем: источники э.д.с., емкость, индуктивность, линейный и нелинейный резистор, коммутационные элементы, выключатель идеальный и с учетом явления гашения дуги, трехфазные синхронные ге-

нераторы по упрощенным моделям и модели Парка-Горева, многополюсные преобразователи из различных систем координат, многопроводные длинные линии и идеальные трансформаторы.

С помощью представленных подпрограмм можно проводить исследования коммутационных перенапряжений, расчет переходных токов к.з. и восстанавливающихся напряжений на контактах выключателей, расчет отключающей способности реальных выключателей. Все эти вопросы изложены в качестве примеров применения комплекса МАЭС.

Отчет состоит из введения, 3 разделов, заключения и приложения.

В разделе 2 дано описание принципов построения комплекса МАЭС, основанное на материале книги [I].

В разделе 3 описываются программы комплекса МАЭС и алгоритмы построения подпрограмм.

В разделе 4 приведены примеры использования комплекса МАЭС для расчета переходных процессов в электроэнергетических схемах.

Представленные программы могут быть использованы в проектных и научно-исследовательских организациях, занимающихся проектированием энергосистем, разработкой и испытанием выключателей высокого напряжения.

2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ МАЭС

2.I. Методологические основы

В основу комплекса положена совокупность алгоритмических и программных приемов моделирования и анализа электрических схем, имеющая название модельного метода [I]. Данный метод предназначен для анализа линейных и нелинейных электрических цепей постоянного и переменного токов.

Под электрической цепью понимается произвольная совокупность многополюсников (компонентов), выводы которых, именуемые ветвями цепи, соединены в точки, именуемые узлами цепи. Совокупности выводов (ветвям цепи с номерами I, 2, ..., M) соответствует вектор токов $|i|^T=(i_1, i_2, \dots, i_m)$. Узлам цепи с номерами 0, I, ..., N – соответствует вектор напряжений $|u|^T=(u_0, u_1, \dots, u_n)$. Вектор $|V|=(u, i)$ имеет название вектора переменных цепи.

Математической моделью компонента цепи является совокупность соотношений, связывающих переменные на выводах компонента.

Математической моделью цепи является совокупность соотношений, задающих топологический закон, и соотношений математических моделей компонентов цепи. Задача моделирования цепи заключается в сведении всех этих соотношений в одну систему, задача анализа – в исследовании этих соотношений с целью определения вектора переменных цепи, т.е. в решении совокупной системы уравнений.

В качестве топологического закона выбран закон Кирхгофа для токов. Использование этого закона упрощает процесс моделирования цепи, так как не требует понятий замкнутого контура и падения напряжения в ветви.

Как известно, совокупность законов Кирхгофа для всех узлов образует линейно-зависимую систему. Поэтому законы Кирхгофа для

токов применяется для всех узлов, кроме нулевого узла. В общем случае, номер этого узла не играет роли. Для напряжений необходимо выбрать точку отсчета. Без потери общности в качестве точки отсчета выбирается нулевой узел, потенциал которого приравнивается нулю*).

В дальнейшем полагается, что задание цепи осуществляется путем перечисления составляющих ее многополюсников с указанием номеров ветвей, образованных выводами многополюсников, и номеров узлов, к которые ведут выводы. Каждому многополюснику соответствует некоторая математическая модель, расписанная относительно токов и напряжений на выводах многополюсника. Модель расписывается в предположении фиксированной нумерации выводов и узлов. Этого же порядка перечисления следует придерживаться и при задании ветвей и узлов цепи на этапе кодировки схемы.

Математическая модель цепи образуется математическими моделями компонентов, законами Кирхгофа для токов для всех узлов кроме нулевого и заданием условия равенства нулю потенциала узла.

Рассматриваемый метод требует специальной организации математических моделей компонентов цепей. Модель n - полюсника должна включать в себя n уравнений. Исключение составляют двухполюсники, для которых выполняется равенство втекающего и вытекающего токов. Включение этого равенства в модель избыточно, поэтому модели таких двухполюсников состоят из одного уравнения.

2. Численные методы решения

Обобщенная модель многополюсника может включать в себя следующие уравнения:

1. Линейные алгебраические уравнения вида

$$F(u,i)=C,$$

*) Далее нулевым узлом всегда выбирается земля.

где $[u]^T=(u_1, u_2, \dots, u_n)$, $[i]^T=(i_1, i_2, \dots, i_n)$ - напряжения и токи на выводах моделируемого n - полюсника. $F(u,i)$ - линейная форма с постоянными коэффициентами.

2. Нелинейные алгебраические уравнения вида

$$F(u,i)=f(u,i,t).$$

Здесь F - произвольная линейная форма от своих аргументов с постоянными коэффициентами, f - линейная или нелинейная функция.

3. Дифференциальные уравнения вида

$$\frac{dF(u,i)}{dt}=f(u,i,t),$$

где F - линейная форма с постоянными коэффициентами, f - произвольная функция.

4. Линейные относительно производных уравнения с переменными коэффициентами:

$$\sum_j a_j(u,i,t)\frac{du_j}{dt}+\sum_i b_i(u,i,t)\frac{di_i}{dt}=C(u,i,t).$$

Модель каждого компонента может состоять из произвольной комбинации таких уравнений.

В качестве методов численного интегрирования дифференциальных уравнений выбраны неявные методы Эйлера и трапеций, имеющие соответственно второй и третий порядок точности. Неявные методы интегрирования, устойчивые по отношению к ошибкам округления, позволяют обойти проблему разброса постоянных времени, т.е. наличия так называемых быстрых и медленных переменных [2].

Методы численного интегрирования могут быть проиллюстрированы на дифференциальном уравнении вида

$$\frac{dV}{dt}=f(V,t).$$

Разностное уравнение по схеме Эйлера имеет вид:

$$\frac{V^{j+1}-V^j}{H}=f(V^{j+1},t^{j+1}),$$

где j - номер шага, H - величина шага. Уравнение можно записать другим образом:

$$V^{j+1}=V^j+H\cdot f(V^{j+1},t^{j+1}).$$

Разностное уравнение по схеме трапеций имеет вид:

$$\frac{V^{j+1}-V^j}{H}=\frac{1}{2}\left[f(V^j,t^j)+f(V^{j+1},t^{j+1})\right],$$

или $V^{j+1}=V^{j}+\frac{H}{2}\left[f(V^{j},t^{j})+f(V^{j+1},t^{j+1})\right]$

Если функция $f(V,t)$ линейна относительно V, то разностные уравнения разрешаются относительно V^{j+1}. В общем случае получается нелинейное разностное уравнение, которое линеаризуется методом Ньютона-Рафсона [3].

Данный метод линеаризации можно показать на примере системы n нелинейных алгебраических уравнений.

$$F(V)=0 \qquad (1)$$

с n неизвестными. Примем, что $V^{(s)}$ величина V, полученная при S-й итерации. Получим разложение Тейлора функции F относительно точки $V^{(s)}$:

$$F(V)=F(V^{(s)})+\sum_{k}\frac{\partial F(V)}{\partial V_k}\Big|_{V=V^{(s)}}(V_k-V_k^{(s)})+o\left[(V_k-V_k^{(s)})^2\right].$$

Подставив $V=V^{(s+1)}$ - величину V на $(s+1)$-й итерации в это уравнение, получим

$$F(V^{(s+1)})=F(V^{(s)})+\sum_{k}\frac{\partial F(V)}{\partial V_k}\Big|_{V=V^{(s)}}(V^{(s+1)}-V^{(s)})+o\left[(V_k^{(s+1)}-V_k^{(s)})^2\right].$$

При предположении, что $V^{(s)}$ является хорошим приближением к точному решению, так что каждая компонента вектора $V^{(s+1)}-V^{(s)}$ мала, можно пренебречь всеми членами высшего порядка в последнем уравнении и считая $V^{(s+1)}$ решением уравнения $F(V)=0$, получим приближенное соотношение:

$$F(V^{(s+1)})=F(V^{(s)})+\sum_{k}\frac{\partial F(V)}{\partial V_k}\Big|_{V=V^{(s)}}(V^{(s+1)}-V^{(s)})=0,$$

которое можно записать следующим образом:

$$J(V^{(s)})(V^{(s+1)}-V^{(s)})=-F(V^{(s)}), \qquad (2.1)$$

где $J(V^{(s)})$ - матрица Якоби от $F(V)$ в точке $V=V^{(s)}$.

Уравнение (2.1) является линейным относительно $V^{(s+1)}$ и используется в моделях комплекса программ МАЭС.

2.3. Принципы организации анализа схем

Методика организации анализа основывается на положении, что исследуемая цепь имеет N узлов (с номерами 0, 1, ..., $N-1$) и M ветвей (с номерами 1, 2, ..., M). Математическая модель цепи представляется системой линейных алгебраических уравнений

$$[\Phi]|V|=|W|. \qquad (2.2)$$

Элементы матрицы $[\Phi]$ представляют собой коэффициенты уравнения $U_0=0$, далее - линейных алгебраических однородных уравнений, задающих закон Кирхгофа для всех узлов, кроме нулевого, и затем - коэффициентов линейных форм в левых частях уравнений моделей элементов, составляющих исследуемую цепь. Каждому уравнению модели соответствует строка $[\Phi]$ - матрицы.

В вектор $|W|$ заносятся соответствующие правые части уравнений.

Алгоритм формирования $[\Phi]$ - матрицы и вектора $|W|$ довольно прост и не требует специального исследования топологии цепи.

Матрица $[\Phi]$ является разреженной (имеется большое количество нулевых элементов). В комплексе МАЭС принято две формы хранения $[\Phi]$-матрицы: в полном и плотном (без нулевых элементов) виде. Хранение в полном виде позволяет существенно ускорить решение системы уравнений, но налагает ограничения на величину вектора решения вследствие нехватки оперативной памяти ЭВМ. Хранение матрицы в плотном виде позволяет разрешить эту проблему, однако решение проводится медленнее.

Плотная $[\Phi]$ - матрица представляется в виде трех массивов:

числового массива М3, который содержит все ненулевые элементы $[\Phi]$-матрицы, выбранные подряд построчно и топологических массивов В и М2.

Массив В содержит элементы, каждый из которых дает число переменных в одном уравнении модели (число ненулевых элементов в одной строке матрицы $[\Phi]$). В массиве М2 хранятся номера переменных с ненулевыми коэффициентами, входящие в каждое уравнение модели.

Вектор $|W|$ не требует большого объема памяти для хранения и записывается полностью вместе с нулевыми элементами.

Решение системы уравнений (2.2) осуществляется методом исключения Гаусса-Жордана (с выбором главного элемента по строке). Организация программы, реализующей метод исключения для плотной матрицы, более сложна по сравнению с методом исключения для полных матриц. Усложнение связано с тем, что на каждом шаге исключения изменяется структура массивов М2 и М3, т.е. количество и расположение ненулевых элементов в каждой строке матрицы. При этом возможен значительный рост массивов М2 и М3, точная оценка которого заранее невозможна.

2.4. Кодирование схемы

Прежде чем приступить к непосредственному кодированию, необходимо представить принципиальную схему таким образом, чтобы в ней не осталось разомкнутых контуров, далее выделяется компонентный состав цепи и производится кодирование схемы.

При кодировании схемы следует придерживаться следующих правил:

I. Узлы и ветви схемы нумеруются в любой последовательности, узлы - начиная с нуля, ветви - с единицы. При этом не допускается пропуска номеров. Ветвями многополюсных элементов в соответствии с введенными ранее определениями являются их выводы.

2. Для пассивных двухполюсников направления токов произвольны, для источников напряжения направление задается от плюса к минусу. У многополюсных элементов направления токов необходимо согласовывать с заданием модели.

3. При занесении информации следует учитывать, что знак минус соответствует току, выходящему из узла, а знак плюс - входящему в узел. Двухполюсники имеют два выхода, но при равенстве втекающего и вытекающего тока представляют одну ветвь, поэтому у таких двухполюсников проставляется один и тот же номер ветви.

2.5. Программная реализация моделей элементов

При составлении математической модели многополюсника все его полюса и соответствующие им выводы нумеруются в произвольном порядке, после составления модели нумерации выводов фиксируется.

Модели элементов в комплексе МАЭС реализуются в виде подпрограмм на языке ФОРТРАН. Общий вид обращения к подпрограмме модели элемента можно представить следующим образом:

$$CALL\ MODEL(P_1, P_2, \ldots, P_K, \pm B_1, \pm B_2, \ldots, \pm B_m, N_1, N_2, \ldots N_m)$$

где MODEL - идентификатор подпрограммы элемента;

$P_1, P_2, \ldots, P_K$ - фактические параметры внутренних переменных модели, определяющие его количественно;

$\pm B_1, \pm B_2, \ldots, \pm B_m$ - номера ветвей элемента в схеме, знак определяет направление для тока;

$N_1, N_2, \ldots, N_m$ - номера узлов элемента в схеме.

Параметры $P_1, P_2, \ldots, P_k, \pm B_1, \pm B_2, \ldots, \pm B_m, N_1, N_2, \ldots N_m$ характеризуют элемент количественно и топологически.

Подпрограммы элементов используют информацию, которая передается через COMMON - блоки. Взаимосвязь всех подпрограмм осуществляется также через COMMON- блоки.

Содержание общих блоков

/BRANCH/M - число ветвей в цепи;

/NODE/N - число узлов в цепи;

/HT/H,T,TeH - шаг по времени, T - текущее время расчета;

/JJ1/J,J1 где J - индекс, используемый для формирования массивов M1, M2, M3; J1 - индекс, используемый при формировании массивов B и W ;

/PI/PI - признак, по значению которого определяется режим работы модели, $PI = \begin{cases} 0; \\ 1; \end{cases}$

V - вектор переменных цепи, $V = \{u_0, u_1, \ldots, u_{N-1}, i_1, i_2, \ldots i_M\}$;

W - массив правых частей системы уравнений модели цепи;

B - массив элементов, определяющих число переменных в одном уравнении модели;

M1 - массив, содержащий топологическую информацию об исследуемой схеме, используется при составлении законов Кирхгофа для токов в узлах;

M2 - массив, содержащий топологическую информацию о матрице $[\Phi]$;

M3 - массив, содержащий ненулевые элементы матрицы $[\Phi]$;

KL - массив признаков для уравнений моделей,

$$KL(J1) = \begin{cases} 0 & \text{для уравнения с постоянными коэффициентами;} \\ 1 & \text{для уравнений с переменной правой частью;} \\ 2 & \text{для уравнения с переменными коэффициентами.} \end{cases}$$

3. ПРОГРАММЫ КОМПЛЕКСА МАЭС

3.1. Подпрограммы анализа и сервисные подпрограммы при расчете с плотной матрицей и постоянным шагом

3.1.1. Постоянный шаг. Для организации анализа электрических схем и вывода результатов счета на печать служат подпрограммы THEMN1 и THEMN2. Работа THEMN2 отличается от работы THEMN1 способом выдачи результатов расчета на АЦПУ.

Обращение к THEMN1 :

CALL THEMN1(THEMSS, MS, NS, T, H, IP, KP, NV, LR, TB, TD)

THEMSS- идентификатор подпрограммы схемы;

MS - число ветвей в схеме (с нумерацией 1, 2, ..., MS);

NS - число узлов в схеме (с нумерацией 0, 1, ..., NS-1);

T - время решения;

H - шаг интегрирования;

IP - признак выдачи на печать,

$$IP = \begin{cases} 1, & \text{печать вектора решения } V \text{ через } KP \text{ шагов;} \\ 2, & \text{вывод переменных (одной, двух, трех) и текущего времени счета на график через } KP \text{ шагов с одновременным выводом этих же переменных в числовой форме справа от графика;} \end{cases}$$

KP - шаг печати;

NV - число элементов массива V , выводимых на печать;

LR - размерность массива M2 или M3;

TB - время расчета, начиная с которого осуществляется выдача на печать;

$T\emptyset$ – начальное время расчета.

Выдача на печать подпрограммой THEMN1 осуществляется на каждом шаге расчета без запоминания в ЭВМ результатов решения.

При необходимости вывода результатов решения на график перед обращением к THEMN1 требуется обратиться к подпрограмме THEMG1 при выдаче одной переменной, к подпрограммам THEMG2, THEMG3 при выдаче двух или трех переменных, соответственно (см. 3.I.3).

Обращение к THEMN2 :

CALL THEMN2(AS,MS,NS,T,H,IP,I1,I2,I3,KI,KP,KG,NV,LR,TB,TØ)

AS – идентификатор подпрограммы схемы;

MS – число ветвей в схеме (с нумерацией I,2,...,MS);

NS – число узлов в схеме (с нумерацией 0,I,...,NS-I);

T – время решения;

H – шаг интегрирования;

IP – признак выдачи на печать;

IP = { I, печать вектора решения цепи V через KP шагов;
2, вывод на график заданных переменных V ;
3, вывод заданных переменных на график и вывод вектора решения цепи V ;

I1,I2,I3 – индексы выводимых на график переменных V ; для выдачи напряжения в узле следует указать индекс, равный номеру узла, для выдачи тока в ветви Bк следует указать индекс равный NS+|Bк|-1 ; содержимое V(1) соответствует напряжению нулевого узла всегда равное нулю, при выдаче в V(1) хранится текущее время расчета;

KI – число выводимых на график переменных,

KI = { 0, вывод на график не нужен;
I, печатается график переменной с индексом I1,

индекси I2, I3 – произвольные целые числа;
2, печатаются графики переменных с индексами I1 и I2, индекс I3 – любое целое число;
3, печатаются графики переменных с индексами I1, I2, I3;

KP – шаг печати вектора решения цепи V ;

KG – шаг вывода на график;

NV – количество элементов массива V , выводимых на печать;

LR – размерность массива M2 или M3;

TB – время расчета, начиная с которого осуществляется выдача на печать;

$T\emptyset$ – начальное время расчета.

Выдача на печать графиков осуществляется с помощью массивов, в которых накапливаются значения выбранных переменных и время. Накопление происходит до I00 значений одной переменной. Подпрограмма THEMN2 применяется в том случае, когда требуется печатать одновременно вектор решения и выводить на график требуемое количество переменных. В THEMN2 предусмотрена выдача графика, если размерность накопленных переменных по окончании счета не достигает I00. Обращений перед THEMN2 при необходимости вывода на график к другим подпрограммам не требуется.

Примечание. Анализ схем можно проводить с кусочно-постоянным шагом по времени. Для этого необходимо обратиться к подпрограмме THEMN1 или THEMN2 соответствующее количество раз. Время выхода из каждой подпрограммы (время перехода к другому шагу) определяется априорно.

3.I.2. Итерационный шаг. В данном комплексе программ представлены нелинейные элементы, какими являются резистор, управляемый падением напряжения (см.3.4.3) и электрическая дуга гашения (см.3.9.2). Для организации анализа электрических схем, содержа-

ных названные элементы, разработана подпрограмма THEMNJ, являющаяся аналогом подпрограммы THEMN1, но позволяющая проводить итерации всей схемы на каждом шаге расчета.

Обращение к THEMNJ:

CALL THEMNJ(THEMSS,MS,NS,T,H,IP,KP,LR,EPS,NV,TJ,JK,TB,TØ)

THEMSS - идентификатор подпрограммы схемы;

MS - число ветвей в схеме (с нумерацией I,2,..., MS);

NS - число узлов в схеме (с нумерацией 0,I,..., NS-I);

T - время решения;

H - шаг интегрирования;

IP - признак выдачи на печать;

IP { I, печать вектора решения цепи V через KP шагов;
2, вывод переменных (одной, двух, трех) и текущего времени счета на график через KP шагов с одновременным выводом этих же переменных в числовой форме справа от графика; }

KP - шаг печати;

LR - размерность массива M2 или M3;

EPS - относительная точность итерационного расчета элементов вектора V от I до NV;

NV - количество элементов вектора V, проверяемых на точность расчета и выводимых на печать при IP = I;

TJ - время расчета, начиная с которого ведется итерационный расчет (при $t \le TJ$ подпрограмма THEMNJ работает как THEMN1);

JK - задаваемое количество предельно допустимых итераций на шаге расчета;

TB - время расчета, начиная с которого производится выдача на печать;

TØ - начальное время расчета.

Подпрограмма THEMNJ повторяет вычисления в итерационном цикле на каждом шаге расчета. Выход из цикла производится при превышении количества итераций величины JK, либо выполнением условия

$$|V^{(S+1)} - V^{(S)}| \le EPS \cdot |V^{(S+1)}|$$

Модели нелинейных элементов построены на основе итерационного метода Ньютона-Рафсона, позволяющие применить этот метод в целом для всей схемы.

Примечание. Подпрограмма THEMNJ дополнительно использует COMMON - блоки:
COMMON/VØ/VØ(NV)/VJ/VJ(NV)/VØ1/VØ1(NV)/VJ1/VJ1(NV)
В массивах VØ, VJ, VØ1, VJ1 запоминаются значения массива V на предыдущих шагах и предыдущих итерациях.

3.I.3. Сервисные подпрограммы. Подпрограммы THEMG1, THEMG2, THEMG3 предназначены для задания диапазонов изменяемых величин, выводимых на график переменных и задания их индексов. Применяются перед обращением к THEMN1 и при необходимости вывода результатов расчета на график.

Обращения:

CALL THEMG1(A1MIN,A1MAX,IND1)
CALL THEMG2(A1MIN,A1MAX,IND1,A2MIN,A2MAX,IND2)
CALL THEMG3(A1MIN,A1MAX,IND1,A2MIN,A2MAX,IND2,A3MIN,A3MAX,IND3)

A1MIN,A2MIN,A3MIN - минимумы соответствующих выводимых переменных;

A1MAX,A2MAX,A3MAX - максимумы соответствующих выводимых переменных;

IND1,IND2,IND3 - индексы выводимых переменных.

Для выдачи напряжения в узле указывается индекс равный номеру узла, для выдачи тока в ветви Bк указывается индекс равный NS + |Bк| - 1.

Все последующие подпрограммы, описываемые в этом пункте, непосредственно пользователем комплекса программы МАЭС не используются, они являются внутренними для подпрограмм THEMN1, THEMN2 и THEMNJ.

1). Подпрограмма THEM TA

Предназначена для вывода на печать одномерного массива.

Обращение:

CALL THEM TA(A,K,M)

A - идентификатор выводимого массива;

K - размерность выводимого массива;

M - индекс, с которого начинается нумерация выводимого массива.

2). Подпрограмма THEM ZG

Предназначена для печати заголовка графика.

Обращение:

CALL THEM ZG

Подпрограмма без параметров.

3). Подпрограмма THEM OU

Предназначена для печати графика и справа от графика значений времени и выводимых переменных.

Обращение:

CALL THEM OU(V)

V - идентификатор массива, из которого выбираются переменные.

4). Подпрограммы THEMF1, THEMF2, THEMF3.

Предназначены для формирования графиков с накоплением. Используется в THEMN2.

Обращения:

CALL THEMF1(HPCH,IND1)

CALL THEMF2(HPCH,IND1,IND2)

CALL THEMF3(HPCH,IND1,IND2,IND3)

HPCH - шаг печати;

IND1, IND2, IND3 - индексы выводимых на график переменных.

5). Подпрограмма THEM PC

Предназначена для накапливания массива переменных, выводимых на график подпрограммой THEM UT. Используется в THEM N2.

Обращение:

CALL THEM PC(M)

M = { 0, происходит накопление массивов до 100 и печать;
      1, печать массива размерностью менее 100.

6). Подпрограмма THEM UT

Предназначена для формирования и печати графика. Используется в THEM PC.

Обращение:

CALL THEM UT(TIME,AV,K,I1)

TIME - массив времени;

AV - массив выводимых переменных;

K - размерность массива AV;

I1 - размерность массива TIME.

3.I.4. Подпрограммы анализа. Подпрограммы предназначены для организации заполнения массивов системы уравнений

$$[\Phi]|V| = |W| \qquad (3.1)$$

и ее решения.

Описанные здесь подпрограммы непосредственно пользователем не употребляются, они используются внутри соответствующих подпрограмм.

1). Подпрограмма THEMST

Предназначена для организации на каждом шаге расчета запоминания массивов системы (3.1) подпрограммой THEM KG и подпрограммой схемы, а также обращения к подпрограмме THEMSL

решения (3.I). Используется подпрограммами THEMN1, THEMN2, THEMNJ.

Обращение:

CALL THEMST(AS,MS,NS,LR)

AS - идентификатор подпрограммы схемы;

MS - число ветвей в схеме;

NS - число узлов в схеме;

LR - размерность массивов M2 и M3.

2). Подпрограмма THEMKG.

Предназначена для формирования уравнений закона Кирхгофа для токов в узлах схемы и занесения их в систему (3.I). Используется подпрограммой THEMST.

Обращение:

CALL THEMKG

Подпрограмма без параметров.

3). Подпрограмма THEMSL

Предназначена для решения системы уравнений (3.I) методом Гаусса-Жордана (с выбором главного элемента на строке) с матрицей [Ф], записанной в "плотном" виде.

Обращение:

CALL THEMSL(L1,L2)

L1 - размерность решаемой системы;

L2 - размерность резерва массивов M2 и M3.

Увеличение массивов заранее предсказать нельзя, поэтому рекомендуется выбирать

$$L2 \approx \frac{1}{5} L1^2$$

Если L2 задано меньше, чем необходимо, то из подпрограммы THEMSL выдается диагностика:

STOP1-MAL REZERV B SL

В этом случае необходимо увеличить L2.

3.I.5. Главная подпрограмма и подпрограмма схемы. Работа пользователя комплекса программ МАЭС состоит из составления MAIN PROGRAM (PROGRAM для БЭСМ-6) и подпрограммы (SUBROUTINE) с наименованием схемы без параметров.

MAIN PROGRAM содержит в себе:

I) описание оператором EXTERNAL подпрограммы схемы;

2) описание общих блоков с указанием размерностей массивов;

3) занесение начальных данных в массив V (оператором DATA или каким-либо другим способом);

4) обращение к сервисным кодирограммам при выдаче на АЦПУ графиков (подпрограммы THEMG1, THEMG2, THEMG3);

5) обращение к подпрограмме анализа схемы (THEMN1, THEMN2, THEMNJ);

6) оператор STOP;

7) оператор END

Общие блоки оценки размерностей массивов.

/N/N(NV), минимальная размерность $NV = MS + NS$, где MS - количество ветвей в схеме, NS - количество узлов;

/W/W(NW), минимальная размерность $NW = MS + NS$.

/B/B(NB), размерность $NB = Md + \sum_{k}^{Mm} P_k$, где Md - количество простых двухполюсников в схеме, P_k - количество полюсов у k - того многополюсника, Mm - число многополюсников в схеме (включая обобщенные двухполюсники).

/M1/M1(NM1), - размерность $NM1 = 4Md + 2\sum_{k}^{Mm} P_k$, где Md и P_k имеют тот же смысл, что и в формуле для определения NB.

/M2/M2(NM2), размерность NM2 оценивается величиной $\approx 10 \cdot NV$.

/M3/M3(NM3), размерность NM3 также оценивается величиной $10 \cdot NV$

Точное вычисление размерностей массивов M2 и M3 невозможно вследствие непредсказуемых изменений при решении методом исключения.

/K1,/KL/NKL/, размерность NKL равна размерности массива /W .

Подпрограмма схемы содержит в себе:

1) описание общих блоков (если они используются непосредственно в подпрограмме схемы);

2) описание массивов с указанием размерностей , используемых подпрограммами элементов (например, при применении THEMLI);

3) описание оператором EXTERNAL подпрограмм и подпрограмм-функций (при применении THEMAR и т.п.);

4) вызов в произвольном порядке (рекомендуется вызывать в порядке нумерации ветвей) подпрограмм элементов схемы;

5) оператор RETURN ;

6) оператор END .

В подпрограмме схемы могут применяться любые другие операторы, однако необходимо иметь ввиду, что данная подпрограмма на каждом шаге расчета прорабатывает дважды. Описав оператором COMMON/PI/IP, можно использовать значение величины IP (при первом обращении IP =0, при втором IP=I) для организации необходимых алгоритмов.

3.2. Подпрограммы анализа и сервисные подпрограммы при расчете с полной и "плотной" матрицей и переменным шагом

3.2.I. Общие сведения. В 3.2 дается изложение подпрограмм анализа и сервисных подпрограмм, которые являются разработками второй очереди развития комплекса программ МАЭС . Данные подпрограммы позволяют проводить расчеты с полной и плотной матрицей, с автоматическим выбором шага и кусочно-постоянным шагом. Операции с полной матрицей позволяют для не очень больших схем (L =BRANCH + NODE ≤ 100) сократить в 2-3 раза машинное

время, затраченное на проведение расчета. Однако расчет больших схем с полной матрицей невозможен из-за нехватки оперативной памяти ЭВМ.

Работа с полной матрицей для линейных схем при обращении матрицы не на каждом шаге расчета, а только при совершении некоторых изменений (изменение шага расчета, совершение коммутации) является эффективным средством повышения скорости расчета (расчет производится в 10 раз быстрее по сравнению с расчетом при плотном представлении матрицы).

Автоматический выбор шага применяется в случае неизвестного характера протекания процесса. Такой расчет занимает довольно продолжительное время. При известном характере протекания процесса рекомендуется применять кусочно-постоянный шаг. Для схем, содержащих трехфазные длинные линии, реализация автоматического выбора шага затруднительна. В данном случае необходимо использовать вариант с кусочно-постоянным шагом (использовать при этом подпрограмму THEM LT). Схемы с многопроводными линиями следует рассчитывать с постоянным шагом.

3.2.2. Подпрограмма для расчета с автоматическим выбором шага и постоянным шагом. Организацию анализа электрических схем и вывод результатов счета на печать осуществляет подпрограмма THEM NL .

Обращение:

CALL THEM NL(AS,MS,NS,LR,EPS,TINT,HMIN,HMAX,LV,N1,N2,K1,K2,

AS - идентификатор подпрограммы схемы;

MS - число ветвей в схеме (с нумерацией I,2,..., MS);

NS - число узлов в схеме (с нумерацией 0,I,..., NS-I);

LR - размерность массива M3;

EPS - абсолютная погрешность расчета на шаге по времени;

TINT - время решения;

HMIN - минимальный шаг по времени;

HMAX - максимальный шаг по времени;

LV - число элементов массива V , проверяемых по точности расчета;

N1,N2 - номера переменных, выводимых на график;

K1 - шаг выдачи на печать массива V ;

K2 - шаг выдачи на график выбранных переменных.

При задании HMIN=HMAX расчет производится с постоянным шагом.

3.2.3. Подпрограмма для расчета с кусочно-постоянным шагом. Организация расчета схем с кусочно-постоянным шагом осуществляет подпрограмма THEMNT.

Обращение:

CALL THEMNT(AS,MS,NS,EPS,TINT,HMIN,HMAX,LV,N1,N2,K1,K2)

Смысл идентификаторов такой же, что и в подпрограмме THEMND.

Отличия от подпрограммы THEMND:

1. Необходимо задать HMIN=HMAX .

2. В главной подпрограмме добавляются общие блоки:

COMMON/TI/TI(LT)/HI/HI(LT)/NT/LT

TI(1) - время окончания первого участка;

HI(1) - шаг на первом участке;

...

...

...

TI(LT) - время окончания последнего участка;

HI(LT) - шаг на последнем участке.

3.2.4. Сервисные подпрограммы. Описываемые в этом пункте подпрограммы непосредственно пользователем комплекса программ МАЭС не используются, они являются внутренними для подпрограмм THEMND и THEMNT .

1). Подпрограмма THEMU1

Предназначена для организации выдачи на АЦПУ результатов расчета. Используется в подпрограммах THEMND и THEMNT

Обращение:

CALL THEMU1(JP)

JP = { 0 при T < TINT
     { 1 по окончании расчета.

2). Подпрограмма THEMBA

Предназначена для выдачи на печать вектора решения.

Обращение:

CALL THEMBA(A,N,K1,M)

A - идентификатор выводимого массива;

N = 1;

K1 - размерность выводимого массива;

M - индекс, с которого начинается нумерация распечатки выводимого массива.

3). Подпрограмма THEMGP

Предназначена для организации печати при выводе на АЦПУ графика расчета.

Обращение:

CALL THEMGP(A,B,C,JP)

A, B, C - распечатываемые переменные.

JP - то же, что и в подпрограмме THEMU1

4). Подпрограммы THEMA1, THEMA2

Предназначены для организации печати графиков. Подпрограмма THEMA1 используется при печати с текущим шагом расчета, под-

программа THEM A2 - с шагом, задаваемым для печати.

Обращение к THEMA1;

CALL THEM A1(A,B,C, JP)

A, B, C - распечатываемые переменные (A - время);

JP - то же, что и в подпрограмме THEMU1

Обращение к THEMA2

CALL THEMA2(T,V1,V2,JP)

T,V1,V2- распечатываемые переменные (T-время);

JP - то же, что и в подпрограмме THEMU1.

5). Подпрограмма THEMGR.

Предназначена для печати графика

Обращение:

CALL THEMGR(A,B,C,I,K,K2)

A(K),B(K),C(K) -массивы, выводимые на печать;

I = 3;

K2=13.

6). Подпрограмма THEM IT

Предназначена для распечатки целых массивов.

Обращение:

CALL THEM IT(A,N,K1,M)

A(K1) - целый массив, выводимый на печать;

N = 1;

M - начальный номер нумерации распечатываемого массива.

7). Подпрограммы, используемые при отладке программ.

7.1). Подпрограмма THEM MV

Предназначена для распечатки массивов M2, M3, B, W.

Обращение:

CALL THEM MV

подпрограмма без параметров.

7.2). Подпрограмма THEM SY.

Предназначена для распечатки общей системы уравнений для схемы.

Обращение:

CALL THEM SY

подпрограмма без параметров.

7.3).Подпрограмма THEM PR

Предназначена для распечатки массивов M2, M3, B, W, KW.

Обращение:

CALL THEM PR(M)

M - номер распечатки.

3.2.5. Подпрограммы анализа.

1). Подпрограмма THEM PS

Предназначена для организации анализа схемы при работе с плотной матрицей.

Обращение:

CALL THEM PS(AS,LR)

AS - идентификатор подпрограммы схемы;

LR - длина массива M3.

2). Подпрограмма THEM MP

Предназначена для организации анализа схемы при работе с полной матрицей с ее предварительной обработкой.

Обращение:

CALL THEM MP(AS)

AS - идентификатор подпрограммы схемы.

3). Подпрограмма THEM TT

Предназначена для организации анализа схемы с полной матрицей без ее предварительной обработки.

Обращение:

CALL THEM TT(AS,LR)

AS – идентификатор подпрограммы схемы;

LR – размерность массива M3.

4). Подпрограмма THEMIM

Предназначена для организации анализа схемы с полной матрицей и запоминанием обращенной матрицы.

Обращение:

CALL THEMIM(AS)

AS – идентификатор подпрограммы схемы.

Обращение матрицы происходит при значении IPC= -I, при IPC=I пересчёта обратной матрицы нет. Задание IPC осуществляется через общий блок:

COMMON/IPC/IPC

IPC – целая переменная.

4.I). Подпрограмма THEMM3

Предназначена для транспонирования матрицы. Используется подпрограммой THEMIM

Обращение:

CALL THEMM3(A,L)

A(L) – массив матрицы.

4.2). Подпрограмма THEMMI

Предназначена для обращения матрицы методом Гаусса-Жордана Используется подпрограммой THEMIM.

Обращение:

CALL THEMMI(A,N,D,L,M)

A(N)– обращаемый матрица, представленная одномерным массивом;

D – рабочая вещественная переменная;

L ,M – рабочие массивы .

5). Подпрограмма THEMPM

Предназначена для организации обращения к подпрограммам THEMPS, THEMMP, THEMTT или THEMIM. В соответ-

ствии с обращением к одной из перечисленных подпрограмм будет осуществляться расчет с плотной матрицей, с предварительно обработанной полной матрицей, с полной необработанной матрицей и полной матрицей с запоминанием обращённой матрицы.

Обращение:

CALL THEMPM(AS,LR)

AS – идентификатор подпрограммы схемы;

LR – размерность массива M3 .

Обращение к подпрограммам THEMMP , THEMPS , THEMTT и THEMIM производится по признаку IPS , описанному общим блоком: COMMON/PSOK/D/IPS

IPS= 0, обращение к THEMMP;
I, обращение к THEMPS;
2, обращение к THEMTT;
3, обращение к THEMIM.

6). Подпрограмма THEMGK

Предназначена для формирования уравнений закона Кирхгофа для токов в узлах схемы и занесения их в систему [Ф]·|V|=|W|.

Обращение:

CALL THEMGK

подпрограмма без параметров.

6.I). Подпрограмма THEMRE

Предназначена для редактирования информации по топологии схемы. Обнаруживает ошибки и выдает об них сведения на печать. Используется в подпрограмме THEMGK.

Обращение:

CALL THEMRE

подпрограмма без параметров.

7). Подпрограмма THEM SM

Предназначена для решения уравнения $[\Phi]\cdot|V|=|W|$ методом Гаусса-Жордана (с выбором главного элемента по строке) с матрицей $[\Phi]$, записанной в "плотном" виде.

Обращение:

CALL THEM SM(A1,A2,B,W,V,L1,L,N)

A1 - формальный идентификатор для фактического M3;

A2 - формальный идентификатор для фактического M2;

B,W,V - идентификаторы внутренних для комплекса МАЭС переменных;

L - размерность массива M3.

8). Подпрограмма THEM SG

Предназначена для решения уравнения $[\Phi]\cdot|V|=|W|$ методом Гаусса-Жордана с матрицей $[\Phi]$, записанной в полном виде.

Обращение:

CALL THEM SG(TIP,MA,WA,VA,L,L1)

TIP = 0;

MA,WA,VA,L,L1 - целые переменные.

9) Подпрограмма THEM S2

Предназначена для организации обращения к THEM SG

Обращение:

CALL THEM S2(M3,M2,B,W,V,J,LR,LN)

M3, M2, B, W, V - одноименные массивы комплекса МАЭС

LR - размерность M3;

J, LN - идентификаторы внутренних для комплекса МАЭС переменных.

3.2.6. Главная подпрограмма при расчете с автоматическим выбором шага и при расчете с полной матрицей. При использовании подпрограммы THEM NT и THEM NT необходимо учитывать особенности, внесенные в комплекс программ МАЭС для возможности расчета с полной матрицей. Главная особенность - это вынесение большинства идентификаторов в COMMON-блоки.

Для представления больших удобств пользователю составлено стандартное распределение памяти, которым рекомендуется пользоваться при моделировании схем размерностью до 70 в режиме работы с полной матрицей и размерностью до 200 в режиме работы с плотной матрицей (рис.3.I).

Для каждой конкретной схемы вводятся дополнительно следующие данные

BRANCH = 'количество ветвей цепи'

NODE = 'количество узлов (максимальный номер плюс 1)'

HMIN = 'минимальный (начальный) шаг по времени'

HMAX = максимальный шаг по времени (если HMIN=HMAX то интегрирование с постоянным шагом)'

EPS = 'абсолютная точность анализа на шаге'

KHP = 'через KHP шагов по времени на печать выдается значение времени T и вектор переменных цепи'

KHG = 'через KHG шагов по времени переменные NV1 и NV2 откладываться на график'

NV1 = 'номер переменной на графике'

NV2 = 'номер переменной на графике'

Примечание. При указании NV1, NV2 следует учитывать что массив , нумерация которого начинается с единицы, содержит сначала потенциалы $U_0, U_1, U_2, \ldots$, затем токи $I_1, I_2, \ldots$.

BRANCH, NODE, KHP, KHG, NV1, NV2 - целые числа.

HMIN, HMAX, TMIN, TMAX, EPS - вещественные числа.

```
C*****************************************************
C-------------СТАНДАРТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ---------------------
C*****************************************************
      COMMON/JJ1/J(4)/HT/H(4)
      COMMON/Y/Y(200)/Y1/Y1(200)/Y2/Y2(200)/Y3/Y3(200)
      COMMON/M1/M1(500)/M2/M2(3000)/M3/M3(6000)
      COMMON/B/B(200)/W/W(200)/KL/KL(200)
      COMMON/BRANCH/BRANCH/NODE/NODE
      COMMON/ICCC/ICCC/LR/LR
      COMMON/PRINTV/KHP,KHG,JTG,NY1,NY2
      COMMON/TYPAN/TYPAN
      COMMON/EPS/EPS/HMIN/HMIN/HMAX/HMAX
      COMMON/TMIN/TMIN/TMAX/TMAX
      COMMON/LMPS/LMPS,LMAXPS
      COMMON/LPM/LPM,LMATR2,LMATR3
      COMMON/PSOLD/IPS
      COMMON/M4/M4(2000)/M5/M5(2000)
      INTEGER B,BRANCH,TYPAN
      REAL M3
      LR=3000
      ICCC=3
      KHP=1
      KHG=1
      JTG=0
      NY1=2
      EPS=1.E-3
      HMAX=1.
      HMIN=1.E-12
      TMIN=0.
      TMAX=1.
      LMPS=0
      LMAXPS=0
      LPM=500
      LMATR2=2000
      LMATR3=6000
      TYPAN=1
      IPS=1
      DO 1 I=1,200
      Y(I)=0.
    1 KL(I)=0
C*****************************************************
C----------НАЧАЛО ПРОГРАММЫ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ--------------
C*****************************************************
```

РИС.3.1.РАСПЕЧАТКА СТАНДАРТНЫХ КАРТ

TMIN = 'начальное время расчета'

TMAX = 'конечное время расчета'

JTG
- 0 - режим печати графика с автоматически выбираемым кусочно-постоянным шагом по времени;
- 1 - режим печати графика с переменным, полученным программой интегрирования, шагом по времени;
- 2 - режим печати графика с постоянным шагом HGR по времени;

HGR = 'вещественное число, задающее шаг графика при JTG=2'

IPS
- 0 - метод моделирования, основанный на полном представлении матриц, т.е. вместе с нулевыми коэффициентами и предварительной обработкой матриц (работает в три раза быстрее, чем при плотном представлении матрицы IPS=1, но требует дополнительных затрат памяти);
- 1 - метод моделирования, основанный на плотном, т.е. без записи нулевых коэффициентов, представлении матрицы, требует в пять раз меньше памяти, чем при IPS=0;
- 2 - полное представление матрицы без предварительной обработки;
- 3 - полное представление матрицы с запоминанием обращенной матрицы, работает в десять раз быстрее, чем при методе с IPS=0, но пригоден только для линейных цепей с кусочно-постоянным шагом.

При задании данных следует придерживаться следующих рекомендаций:

1) EPS задается не более чем 0,1 % максимальной амплитуды среди всех переменных цепи;

2) величина HMIN выбирается порядка 0,1 минимальной постоянной времени цепи;

3) HMAX задается таким образом, чтобы за один шаг по времени не пропускались важные участки характеристик цепи.

Параметры распределения памяти могут корректироваться после стандартного задания. Используются следующие обозначения:

L - размерность цепи (BRANCH+NODE)

LPM - длина плотной матрицы (величина порядка 5L).

Массивы, описываемые в общих блоках /V/ , /V1/ , /V2/, /V3/ должны иметь размерность не менее L .

Массивы /B/ , /W/, /KL/ - размерность не менее L при IPS = I и не менее 3L при прочих значениях IPS .

Массив /M1/ имеет размерность не менее LPM . При IPS =I (работе с плотными матрицами) размерность массивов /M2/, /M3/ совпадает и равняется LR , где LR - резерв памяти при обработке плотных (без записи нулевых элементов) матриц, LR ≥ 10 L . При IPS =0,2,3 используется полное (вместе с нулевыми элементами) представление матриц , поэтому размерность /M2/ составляет величину порядка 3·LPM , а размерность/M3/ значительно выше и составляет величину порядка 3 · LPM + L² .

Для контроля затрат памяти в процессе решения задач в виде совокупности равенств задаются размерности массивов:

LPM = 'длина массива M1'

LR = 'длина массивов M2 и M3 при IPS = 1'

LMATR2 = 'длина M2 при IPS = 0,2,3'

LMATR3 = 'длина M3 при IPS = 0, 2, 3'

Необходимо внимательно следить за совпадением размерности массивов и заданием их длины в виде равенств. Несовпадение ведет к непредсказуемым сбоям в вычислительном процессе.

Примечание. В стандартных параметрах L =200. Начальное значение V (L) и KL (L) обнуляются.

3.2.7. Интерпретация результатов расчета. Результаты расчета выдаются на печать в табличной и графической форме. Через KNP шагов по времени в виде таблицы выдается на печать совокупность всех переменных цепи и текущее значение времени. Переменные печатаются в сплошной нумерации, начиная с нуля. Сначала печатаются потенциалы узлов, имеющие номера 0, I, ..., NODE-I, затем токи в ветвях под номерами NODE, NODE+I, ..., NODE + +BRANCH - I.

Через KHG шагов по времени на график откладываются переменные NV1, NV2 и текущее значение времени. Для задания NV1 и NV2 осуществляется сплошная нумерация вектора V , начиная с I. Таким образом, NV1 и NV2 на единицу больше номеров соответствующих переменных на распечатке таблицы.

После накопления ста точек происходит печать графика. При достижении TMAX выдается накопленная информация, если на график отложилась хотя бы одна точка.

Если выдача таблиц или построение графиков не требуется, достаточно задать большую величину KNP или KHG . При выдаче графика одновременно распечатываются таблицы, определяющие числовые значения переменных NV1, NV2 и времени T. На графике каждая из переменных независимо автоматически масштабируется для достижения амплитуды во все поле графика.

3.2.8. Анализ ошибок. В комплексе программ МАЭС имеется ряд программ, обеспечивающих диагностику ошибок с выдачей соответствующей информации на печать. Однако имеются ситуации, автоматический диагноз которых невозможен. Отметим следующие ошибки:

I) несовпадение описанной в общем блоке длины массива с заданной в виде равенства (при использовании подпрограмм THEMNT, THEMNT);

2) ошибки в соединениях компонентов;

3) несовпадение количества параметров компонентов с требуемым в описании цепи; транслятор с ФОРТРАНа не контролирует правильности задания аргументов подпрограмм, поэтому при пропуске или установке лишнего параметра (например, при замене точки в числе на запятую) могут произойти непредсказуемые нарушения вычислительного процесса (обычно они связаны с защитой памяти);

4) параметры компонентов обычно являются вещественными числами, номера ветвей и узлов - целыми числами, неправильное задание типов чисел ведет к сбоям;

5) часто бывают ошибки, связанные с неправильной оценкой размерности рабочих массивов;

6) задание чрезмерно высокой точности EPS (при расчете схем с сосредоточенными параметрами) может привести к невозможности решения задачи по затратам машинного времени, слишком грубое задание величины EPS приведет к потере устойчивости вычислительного процесса, поэтому при решении новых типов задач величина EPS подбирается путем оптимизации на нескольких контрольных просчетах.

7) неправильная ориентация ветвей, образованных связями компонентов; модели ряда компонентов выведены для фиксированной ориентации, которой необходимо придерживаться при описании цепи; при кодировании двухполюсников рекомендуется ориентация ветвей (-B,B);

8) существенным ограничением использования комплекса МАЭС на малых ЭВМ являются большие затраты машинного времени, поэтому после первых контрольных просчетов необходимо провести работу по обеспечению максимального быстродействия, которая в зависимости от характера цепи, включает в себя следующие мероприятия:

а) выбор точности EPS, обеспечивающей максимальное развитие шага при сохранении устойчивости;

б) оценка памяти ЭВМ и при возможности переход к расчету в режиме IPS = 0;

в) переход к моделированию с постоянным или кусочно-постоянным шагом (быстродействие по сравнению с автоматическим выбором шага повышается в 5 раз);

г) переход в режим IPS = 3 для линейных схем позволяет увеличить быстродействие в 10 раз;

д) расчет по подсхемам;

9) следует избегать при построении схем замещения двух последовательно включенных разрывов, образующих так называемую "звезду источников тока", и двух параллельно замкнутых контактов, образующих так называемое "кольцо из источников напряжения"; при решении таких схем могут быть прерывания типа деление на нуль.

3.3. Подпрограммы моделей активных элементов

3.3.1. Постоянная э.д.с. - THEMEC. Подпрограмма моделирует источник постоянного напряжения.

Обращение:

CALL THEMEC (EC, -B1, B1, N1, N2)

EC - величина э.д.с.;

±BI - номер ветви;

N1, N2 - номера узлов.

Схема элемента представлена на рис.3.2.

Математическая модель:

$$U_1 - U_2 = -EC$$

Направление тока фиксировано : от плюса к минусу.

3.3.2. Синусоидальная э.д.с. - THEMES . Подпрограмма моделирует синусоидальный источник напряжения с возможным плавным

подъемом с нуля по линейному закону амплитуды э.д.с.

Обращение:

CALL THEM ES(EM, WS, FIФ, TE, -B1, B1, N1, N2)

EM – амплитуда э.д.с.;

WS – круговая частота;

FIФ – начальная фаза (рад.);

TE – время подъема амплитуды э.д.с.;

±BI – номер ветви;

N1, N2 – номера узлов.

Схема элемента представлена на рис.3.3.

Направление тока показано при положительном значении э.д.с.

Математическая модель:

$$U_1 - U_2 \begin{cases} -\frac{t}{TE} \cdot EM \cdot \sin(WS \cdot t + FI\Phi) \text{ при } t < TE; \\ -EM \cdot \sin(WS \cdot t + FI\Phi) \text{ при } t \geq TE. \end{cases}$$

3.3.3. Синусоидальный источник тока – THEMIS . Подпрограмма моделирует источник синусоидального тока.

Обращение:

CALL THEM IS(IM, WS, FIФ, -B1, B1, N1. N2)

IM – амплитуда тока;

WS – круговая частота;

FIФ – начальная фаза (рад);

±BI – номер ветви;

N1, N2 – номера узлов.

Схема элемента представлена на рис.3.4.

Математическая модель :

$$i = IM \cdot \sin(WS \cdot t + FI\Phi)$$

3.3.4. Э.д.с. с произвольными изменениями во времени – THEMET

Подпрограмма моделирует источник напряжения, изменение величины во времени которого задается в табличном виде.

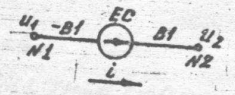

Рис. 3.2. Схема THEM EC.

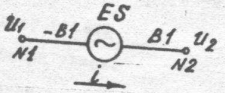

Рис. 3.3. Схема THEM ES.

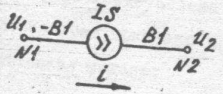

Рис. 3.4 Схема THEM IS.

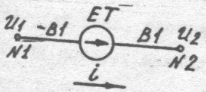

Рис. 3.5. Схема THEM ET.

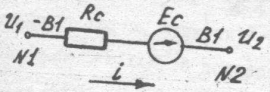

Рис. 3.6. Схема THEM ER.

Обращение:

CALL THEMET(UU, TU, NU, -B1, B1, N1, N2)

UU – массив размерности NU таблицы э.д.с. (функции);

TU – массив размерности NU таблицы времени (аргумента);

NU – размерность массивов UU и TU ;

±B1 – номер ветви;

N1,N2 – номера узлов.

Примечание. Таблица э.д.с. может быть задана с произвольным неравномерным шагом. Интерполяция промежуточных значений таблицы осуществляется с помощью кубических парабол стандартной подпрограммой SPLINC .

Схема элемента представлена на рис.3.5.

Направление тока показано при положительном значении э.д.с.

Математическая модель:

$$u_1 - u_2 = -E(t).$$

3.3.5. Э.д.с. с активным сопротивлением – THEMER. Подпрограмма моделирует цепь, состоящую из активного сопротивления и э.д.с., значения которых вычисляется подпрограммами-функциями. Используется при расчете линеаризованных цепей, содержащих нелинейное активное сопротивление (см. 4.5.4).

Обращение:

CALL THEMER(FR, FE, -B1, B1, N1, N2)

FR, FE – подпрограммы функции FR(u), FE(u) для вычисления $R_c = R_c(u)$ и $E_c = E_c(u)$. В подпрограмме схемы описываются оператором EXTERNAL . Составляются в каждом конкретном случае пользователем.

±B1 – номер ветви;

N1, N2 – номера узлов.

Схема элемента представлена на рис.3.6.

Математическая модель :

$$u_1 - u_2 - R_c \cdot i = -E_c$$

3.3.6. Блок – однофазный генератор – трансформатор THEMEL. Подпрограмма моделирует блок-однофазный генератор-трансформатор в виде э.д.с. за индуктивно-активным сопротивлением. Возможно линейное нарастание э.д.с. с нулевого значения.

Обращение:

CALL THEMEL(EM, WS, FIØ, TE, L, R, -B1, B1, N1, N2)

EM – амплитуда э.д.с;

WS – круговая частота;

FIØ – начальная фаза (рад);

TE – время подъема амплитуды э.д.с.;

L – величина индуктивности (Гн);

R – величина сопротивления (Ом);

±B1 – номер ветви;

N1,N2 – номера узлов.

Схема элемента представлена на рис.3.7.

Математическая модель

$$u_1 - u_2 + ES(t) = Ri + L\frac{di}{dt}$$

следует из закона Ома для ветви рис.3.7.

Уравнение в разностном виде при применении неявного метода Эйлера имеет вид:

$$u_1^{j+1} - u_2^{j+1} - (R + \frac{L}{H})i^{j+1} = -ES(t^{j+1}) - \frac{L}{H}i^j$$

Величина ES(t) определяется согласно выражению:

$$ES(t)\begin{cases} \frac{t}{TE} \cdot EM \cdot \sin(WS \cdot t + FI\emptyset) & \text{при } t < TE; \\ EM \cdot \sin(WS \cdot t + FI\emptyset) & \text{при } t \geq TE. \end{cases}$$

3.3.7. Блок – трехфазный генератор-трансформатор THEME3. Подпрограмма моделирует блок-трехфазный генератор-трансформатор в виде э.д.с. за индуктивно-активным сопротивлением, параметры которого задаются значениями по прямой и нулевой последовательности. Возможно линейное возрастание э.д.с. с нулевого значения.

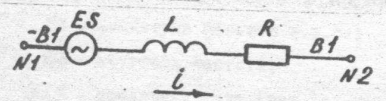

Рис. 3.7. Схема THEM EL

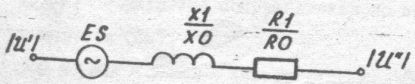

Рис. 3.8. Электрическая схема THEM E3.

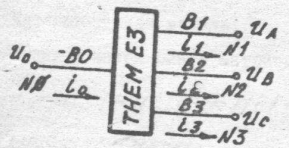

Рис. 3.9. Схема THEM E3.

Обращение:

CALL THEM E3(EM, WS, FI0, TE, X1, X0, R1, R0, -B0, B1, B2, B3, N0, N1, N2, N3)

EM – амплитуда фазного э.д.с.;

WS – круговая частота;

FI0 – начальная фаза (рад.);

TE – время подъема амплитуды э.д.с.;

X1, X0 – индуктивные сопротивления по прямой и нулевой последовательности (Ом);

R1, R0 – активные сопротивления по прямой и нулевой последовательности (Ом);

-B0, B1, B2, B3 – номера ветвей, -B0 – ветвь на землю,

B1, B2, B3 – соответственно ветви фаз A, B, C;

N0, N1, N2, N3 – номера узлов, N0 – номер узла земли,

N1, N2, N3 – соответственно номера фаз A, B, C.

Электрическая схема показана на рис. 3.8.

Схема элемента представлена на рис.3.9.

Математическая модель.

Запишем закон Ома в матричном форме:

$$|u_0 - u| + |ES(t)| = [R]|i| + [L]\frac{d}{dt}|i|,$$

где

$$|u_0 - u| = \begin{vmatrix} u_0 - u_1 \\ u_0 - u_2 \\ u_0 - u_3 \end{vmatrix}; \quad |i| = \begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{vmatrix};$$

$$[R] = \begin{vmatrix} \frac{2R1+R0}{3} & \frac{R0-R1}{3} & \frac{R0-R1}{3} \\ \frac{R0-R1}{3} & \frac{2R1+R0}{3} & \frac{R0-R1}{3} \\ \frac{R0-R1}{3} & \frac{R0-R1}{3} & \frac{2R1+R0}{3} \end{vmatrix}, \quad [L] = \begin{vmatrix} \frac{2X1+X0}{3\cdot WS} & \frac{X0-X1}{3\cdot WS} & \frac{X0-X1}{3\cdot WS} \\ \frac{X0-X1}{3\cdot WS} & \frac{2X1+X0}{3\cdot WS} & \frac{X0-X1}{3\cdot WS} \\ \frac{X0-X1}{3\cdot WS} & \frac{X0-X1}{3\cdot WS} & \frac{2X1+X0}{3\cdot WS} \end{vmatrix}.$$

Матричное уравнение в разностном виде при применении неяв-