

# ОБЩАЯ КОНЦЕПЦИЯ И ПРИНЦИПЫ РЕАЛИЗАЦИИ ИНТЕРАКТИВНОЙ ГРАФИЧЕСКОЙ СРЕДЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ\*

И. Е. НАУМКИН, А. А. ЧЕЛАЗНОВ

*Сибирский научно-исследовательский институт энергетики  
Новосибирск, Россия*

Д. А. ШКУРОПАЦКИЙ, Л. Б. ЧУБАРОВ, Ю. И. ШОКИН

*Институт вычислительных технологий СО РАН  
Новосибирск, Россия*

e-mail: dmitrysh@net.ict.nsc.ru, chubarov@adm.ict.nsc.ru,  
shokin@adm.ict.nsc.ru

The transition to the up-to-date computer technologies in power industry enhances the importance of creating a general information and control system for emergency situations (GICS ES) for power stations. The GICS ES must include an extensive data base, on-line recommendation system, providing the optimization of the response to emergency situation (ES), multi-level complex analyzing various breakdowns of technological systems and showing the possible scenarios of ES and breakdowns. While the breakdown simulation can be a particular problem of the specific technological system, the ES modeling is an inter-industry problem which is to be solved taking into account the general regulations of the software development in each industry. The application software VMAES presented in the paper offers a complete set of facilities for studying the transition problems in power grids. The well-developed program interface facilitates the customization of the problem solution. The VMAES system may be considered one of the necessary components of the GICS ES at power stations.

## 1. Введение

Современные представления о безопасности сложных технических систем базируются на принципе невозможности полного предотвращения аварий и катастроф. Фундаментальные и прикладные разработки, основанные на положении не нулевого риска аварий и катастроф, имеют своей целью сведение к минимуму наносимого ими ущерба.

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант №96-15-96265.

© И. Е. Наумкин, А. А. Челазнов, Д. А. Шкуропацкий, Л. Б. Чубаров, Ю. И. Шокин, 1998.

В системах предотвращения и ликвидации последствий аварийных и чрезвычайных ситуаций большая роль отводится человеку, работающему как неотъемлемое звено системы в экстремальных условиях дефицита времени. Цена за несвоевременные и неадекватные действия по принятию решений может быть очень высока как по экономическим, так и по социальным потерям. В связи с этим актуальной задачей является разработка автоматизированных информационно-управляющих систем по аварийным и чрезвычайным ситуациям (АИУС АЧС) для различных уровней управления: государственного, регионального, отраслевого, объектового. Проект каждого технического объекта, обладающего высокой потенциальной опасностью, должен включать в свой состав такую систему. В электроэнергетике наряду с крупными генерирующими узлами (АЭС, ГЭС, ГРЭС, ТЭЦ) к таким объектам можно отнести и мощные линии электропередачи (действующие 1150 кВ, перспективные полуволновые). Их уникальность обуславливается следующими данными.

- 1) Большая протяженность объекта (1000 – 3000 км). Вследствие этого возникают проблемы обеспечения безопасного функционирования объекта в различных природно-климатических и геологических условиях. Наряду с физическими факторами немаловажную роль играют и социально-политические факторы, например, различия в законодательствах регионов по трассе ЛЭП или в случае экспорта электроэнергии — в законодательствах нескольких государств.
- 2) Большая транспортируемая мощность (3 – 10 ГВт на линию). В силу этого выход из строя ЛЭП может оказать сильное возмущающее воздействие на прилегающие энергосистемы, что даже при обеспечении необходимой устойчивости может стать причиной серьезных экономических и социальных последствий, а в противном случае — вызвать развитие аварийного процесса вплоть до катастрофы весьма высокого уровня (национального, регионального).

Таким образом разработка АИУС АЧС на энергетических объектах должна носить комплексный характер и предусматривать создание методического, технического, информационного и программного обеспечения.

*Методическое обеспечение* необходимо ориентировать на использование вычислительных и эвристических методов, экспертных и гибридных систем (а не стандартных методик ручного применения).

*Техническое обеспечение* должно включать:

- системы мониторинга на базе электронных систем связи;
- системы диагностики аварийных ситуаций и их предвестников; технические средства, обеспечивающие организацию локальных сетей и телекоммуникационного взаимодействия;
- электронно-вычислительную технику; реальные и потенциальные силы и средства по предупреждению и ликвидации аварийных и чрезвычайных ситуаций.

*Информационное обеспечение* должно содержать:

- кадастры возможных причин и источников аварийных и чрезвычайных ситуаций в зоне действия объекта, а также их последствий;
- библиотеку электронных карт с отображением климатических и геологических особенностей территорий;
- базу данных по законодательству территорий;
- архив произошедших на объекте в прошлом аварийных и чрезвычайных ситуаций.

Программное обеспечение необходимо основывать на интеграции передовых технологий экспертных и геоинформационных систем (ГИС) и современных общесистемных средствах. Для воспроизведения и анализа сценариев развития аварийных ситуаций в состав АИУС АЧС должны входить специализированные электроэнергетические моделирующие программные комплексы.

## 2. Базовые модели и алгоритмы для анализа электромагнитных процессов в электрических системах

В настоящей статье обсуждается разрабатываемая авторами система VMAES (Windows-приложение), прототипом которой явилась программа МАЭС для моделирования и анализа электромагнитных процессов в электрических системах, созданная в 80-е годы и ориентированная на электронно-вычислительные машины класса БЭСМ-6 и ЕС ЭВМ. В первой половине 90-х годов эта программа была адаптирована для персональных компьютеров (DOS-версия) и успешно эксплуатировалась в составе автоматизированной системы координации токов коротких замыканий, представляющей собой часть комплекса «Аварийные процессы в электроэнергетике».

### 2.1. Принципы моделирования электрических цепей

В основу программы МАЭС была положена совокупность алгоритмических и программных приемов моделирования и анализа сложных технических систем, получившая название модельного метода [1], который применяется, в частности, для исследования линейных и нелинейных электрических цепей. Электрическая цепь представляется совокупностью многополюсников, выводы которых, называемые ветвями цепи, соединены в узлах цепи. Ветвям цепи с номерами  $1, 2, \dots$ , ставится в соответствие вектор токов  $i^T = (i_1, i_2, \dots, i_M)$ , узлам цепи с номерами  $0, 1, \dots, N$  — вектор потенциалов  $u^T = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ . Вектор  $V = (u, i)$  называется вектором переменных цепи или координатного базиса. Сумма  $L = M + N + 1$  определяет размерность цепи.

Математической моделью компонента цепи является незамкнутая система уравнений, связывающих переменные на выводах этого компонента. Математическая модель цепи представляет собой замкнутую систему уравнений, задающих топологический закон, и соотношений математических моделей компонентов цепи. Задача моделирования цепи заключается в сведении всех уравнений в одну систему, задача анализа — в определении вектора переменных цепи.

В модельном методе в качестве топологического закона выбран закон Кирхгофа для токов. Известно [2], что совокупность законов Кирхгофа для всех узлов образует линейно-зависимую систему, поэтому закон Кирхгофа для токов применяется для всех узлов, кроме нулевого. В общем случае номер этого узла не играет роли. Без потери общности в качестве точки отсчета для напряжений выбирается нулевой узел, потенциал которого приравнивается нулю. Тогда математическая модель цепи представляется системой уравнений:

$$u_0 = 0, \quad [A] \cdot i = 0, \quad F \left( \frac{du}{dt}, \frac{di}{dt}, u, i, t \right) = 0, \quad (1)$$

где  $[A]$  — матрица инциденций, имеющая размерность  $N \times M$ .

Уравнения, определяющие математические модели компонентов цепи, в общем случае являются нелинейными дифференциальными и алгебраическими уравнениями. Дискретизация обыкновенных дифференциальных уравнений осуществляется неявными методами Эйлера или трапеций. Примененные здесь неявные разностные методы обладают абсолютной устойчивостью и позволяют решать жесткие системы дифференциальных уравнений [2]. Получающиеся нелинейные алгебраические уравнения линейризуются методом Ньютона — Рафсона.

Линеаризованная система уравнений составляется для каждого компонента цепи и связывает переменные  $u$  и  $i$  на выводах только этого компонента. Частные производные, являющиеся элементами матрицы Якоби, рассчитываются по аналитическим выражениям, следующим из математической модели компонента цепи. Начальным приближением вектора решений служит его значение на предыдущем шаге по времени, что обеспечивает сходимость итерационного процесса с квадратичной скоростью.

Дискретная форма системы (1) имеет вид:

$$u_0^{n+1} = 0, \quad [A] \cdot i^{n+1} = 0, \quad [B^n] \cdot u^{n+1} + [C^n] \cdot i^{n+1} = D^n, \quad (2)$$

где  $[B^n]$ ,  $[C^n]$ ,  $D^n$  — параметрические матрицы и вектор соответственно. Решение системы (2) производится методом исключения Гаусса — Жордана [2], программная реализация которого описана в [3].

## 2.2. Анализ многофазных цепей

Многофазные цепи характеризуются наличием электромагнитных и электростатических взаимосвязей между элементами отдельных фаз компонентов цепи. Дискретная математическая модель такого многополюсного компонента может быть представлена в форме

$$u^{n+1} + [C^n] \cdot i^{n+1} = D^n \quad (3)$$

и имеет симметричную матрицу  $[C^n]$  с ненулевыми диагональными и недиагональными членами. Если диагонализировать матрицу  $[C^n]$ , то система (3) может быть представлена совокупностью независимых уравнений.

Диагонализация матриц связана с полной проблемой нахождения собственных значений [4]. Диагональная матрица является матрицей собственных значений исходной матрицы, а преобразующая матрица будет являться матрицей собственных векторов. Обозначая матрицу соответствующего линейного преобразования через  $[\Lambda]$ , можно систему (3) представить как систему независимых уравнений:

$$\tilde{u}^{n+1} + [\tilde{C}^n] \cdot \tilde{i}^{n+1} = \tilde{D}^n, \quad (4)$$

где связь преобразованных переменных с фазными представляется соотношениями

$$\tilde{u}^{n+1} = [\Lambda]^{-1} \cdot u^{n+1}, \quad \tilde{i}^{n+1} = [\Lambda]^{-1} \cdot i^{n+1}, \quad (5)$$

а диагональная матрица  $[\tilde{C}^n]$  определяется выражением

$$[\tilde{C}^n] = [\Lambda]^{-1} \cdot [C^n][\Lambda]. \quad (6)$$

Таким образом, многополюсный компонент цепи, математическая модель которого (3) представляет собой взаимозависимую систему уравнений относительно переменных цепи в фазовых координатах, можно заменить на совокупность двухполюсных компонентов, математические модели которых в преобразованных системах координат являются независимыми друг от друга уравнениями (4), и дополнительных многополюсных компонентов, описываемых уравнениями (5). Анализ цепи, включающей такие компоненты, называемые преобразователями, проводится в расширенном координатном базисе

$$V = (u), \tilde{u}, i, \tilde{i},$$

что увеличивает размерность цепи. Однако с помощью ограниченного набора базовых компонентов преобразователи позволяют формировать схемы исходных многополюсников и включать компоненты, математическое описание которых наиболее рационально в отличной от фазовой системе координат.

При расчете переходных электромагнитных процессов в трехфазных цепях наибольшее употребление наряду с фазовыми  $(A, B, C)$ -координатами нашли модальные  $(\alpha, \beta, 0)$ -координаты и вращающиеся  $(d, q, 0)$ -координаты.

Модели базовых компонентов программы МАЭС оформлены в виде подпрограмм языка ФОРТРАН. Информация о топологии, компонентном составе цепи и значениях параметров задается списком компонентов-подпрограмм с указанием номеров ветвей и узлов компонента, а также их параметрических данных. В матричной форме система (2) имеет вид

$$[F] \cdot V = W. \quad (7)$$

Для типовых электроэнергетических схем матрица  $[F]$  является сильно разреженной и может храниться в плотном виде. Для схем, содержащих сложные математические модели с высокой взаимосвязью элементов (например, магнитосвязанные цепи), матрица  $[F]$  может храниться в полном виде. При этом для линейных схем вместо  $[F]$ -матрицы запоминается обратная матрица  $[F]^{-1}$ .

Модельный метод является разновидностью топологических методов анализа схем, к числу которых относятся методы контурных токов, узловых потенциалов, сечений, переменных состояния и гибридный [2]. Их различие определяется выбором координатного базиса. Размерность цепи  $L$  в модельном методе превосходит размерность координатного базиса в таких методах, как метод узловых потенциалов или переменных состояния. Соответственно скорость счета при этом снижается. Однако достоинствами модельного метода являются: отсутствие ограничений на вид компонентов цепи (двух- и многополюсные, линейные и нелинейные, управляемые током и напряжением); простота моделирования цепи вследствие использования закона Кирхгофа для токов, применение которого не требует понятий замкнутого контура и падения напряжения в ветви; алгоритмическая простота математических моделей компонентов цепи, заключающаяся в заполнении матрицы  $[F]$  и вектора  $W$  данными согласно топологии и параметров линеаризованных уравнений.

### 2.3. Базовый состав компонентов цепи

Базовый состав подпрограмм определяется содержанием решаемых с помощью программы МАЭС задач (расчет переходных токов короткого замыкания, перенапряжений, переходных восстанавливающихся напряжений на контактах выключателя, процесса дугогашения в высоковольтных выключателях) и включает следующие компоненты.

- 1) *Активные компоненты цепи* (источники однофазного постоянного и синусоидального напряжения и тока, трехфазный генератор напряжения, синхронный генератор, моделируемый уравнениями Парка — Горева).
- 2) *Пассивные компоненты цепи* (преобразователи координат, линейные и нелинейные активные сопротивления, индуктивности и емкости, трансформаторы с произвольным количеством обмоток и учетом насыщения кривой намагничивания).
- 3) *Коммутационные компоненты цепи*, моделирование которых осуществляется постоянным источником тока (в разомкнутом состоянии) или постоянным источником напряжения (в замкнутом состоянии) с вынуждающими нулевыми значениями тока или ЭДС; в зависимости от логики действия того или иного источника разработаны программы, моделирующие ключи на включение и отключение в заданный момент времени, идеальный выключатель переменного тока с отключением при переходе тока через нуль, искровой промежуток, идеальный тиристор. В программу МАЭС была включена подпрограмма, моделирующая работу выключателя с учетом процесса дугогашения по модели Майра, Касси и обобщенной модели [6].
- 4) *Компоненты цепи с распределенными параметрами*. В электроэнергетических цепях длинные линии являются компонентами с распределенными параметрами, описываемыми гиперболическими уравнениями с частными производными.

Для анализа схем, содержащих длинные линии, используется метод волновых каналов [4]. Наличие преобразователя координат и однофазной (одноканальной) линии позволяет вести расчет переходных процессов в многопроводных линиях, содержащих любое количество фазовых проводов и тросов. В частном случае трехфазная симметричная линия представляется преобразователем из фазовых ( $A, B, C$ )-координат в модальные ( $\alpha, \beta, 0$ ) и системой из трех одноканальных линий с параметрами по прямой и нулевой последовательностям [7]. Моделирование однофазной линии осуществляется с использованием метода бегущих волн [8, 9]. Реализована также возможность учета зависимости параметров линии от частоты с помощью интеграла Дюамеля [10] и цифровых фильтров [11].

### 3. Программная реализация системы VMAES

Программная система VMAES реализует полный набор алгоритмических средств для исследования переходных процессов в электроэнергетических сетях. Ее развитый пользовательский программный интерфейс облегчает процесс описания и адаптации задачи и позволяет пользователю сосредоточиться на ее решении и анализе полученных результатов. Система VMAES обладает возможностями расширения набора элементов схемы, удобного интерфейса для ввода и редактирования схем, набором диалоговых окон для задания свойств элементов и параметров расчета, специальным инструментарием запуска и управления расчетом, возможностями просмотра результатов на экране, вывода их на печать и сохранения в специальных структурах данных. Диаграмма работы пользователя в системе VMAES изображена на рис. 1.

Программная система предназначена для работы в операционных средах, совместимых с ядром Win32<sup>1</sup> : Windows 95, Windows NT. Для нормальной работы программы требуется

---

<sup>1</sup>Система VMAES не предназначена для работы в Windows 3.11 с подсистемой Win32s.

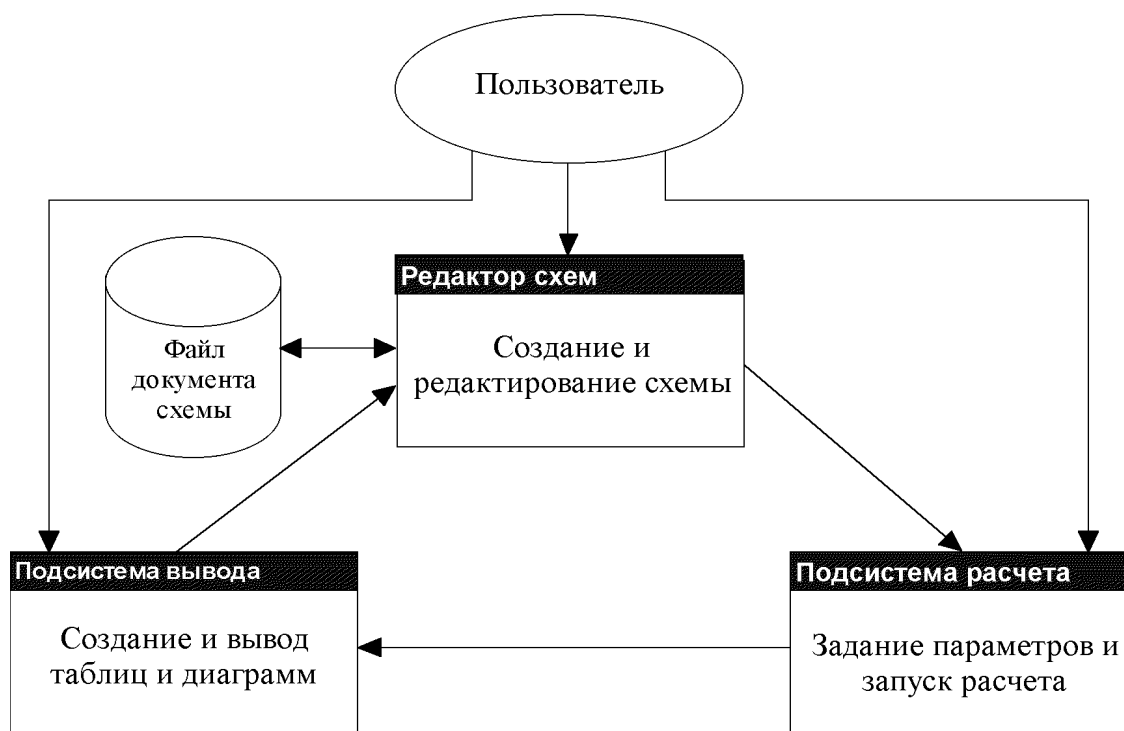


Рис. 1. Диаграмма работы пользователя и информационные потоки в системе VMAES.

8 МВ оперативной памяти в среде Windows 95, процессор 386SX или выше, VGA монитор и видеоадаптер, манипулятор “мышь”<sup>2</sup>.

### 3.1. Оболочка системы

Интерфейс программы содержит следующие элементы управления:

- строка заголовка программы;
- главное меню программы;
- панель инструментов и строка состояния;
- рабочие и диалоговые окна программы.

Интерактивная графическая среда построена по принципу многодокументного интерфейса (MDI), когда каждое окно внутри программы принадлежит отдельному документу и предоставляет пользователю свой набор функций по изменению этого документа. При этом одновременно можно работать только с одним документом (схемой), что является следствием особенностей вычислительного ядра. Однако можно запустить несколько приложений VMAES, каждое из которых будет работать с отдельным документом.

Существуют следующие типы рабочих окон:

- окно схемы;
- окно результатов расчета.

Таким образом, оболочка системы VMAES реализует функции работы с документами (создание, сохранение, открытие) и управления окнами (создание, перемещение и упорядочивание).

<sup>2</sup>Проверка работоспособности программ была выполнена только для русской версии Windows 95. Предполагается, что в Windows NT программы будут выполняться аналогично.

### 3.2. Интерактивный редактор схем

Интерактивный редактор схем предоставляет пользователю функции редактирования схемы (вставка и удаление элементов и ветвей), задания параметров элементов, управления отображением (вывод и скрытие сетки), вывода схемы на печать (рис. 2). Пользователь взаимодействует с редактором схем через окно схемы.

Документы редактора схем состоят из следующих компонент:

- электроэнергетическая схема;
- параметры элементов схемы;
- параметры расчетов схемы.

Внутренний формат документа редактора схем предусматривает наличие трех компонент:

- списка элементов с параметрами;
- схемы соединений элементов;
- набора параметров расчета.

Задается также размер документа.

Собственно схема состоит из компонент двух типов: элементов и ветвей. Оба компонента содержат в себе данные об их графическом расположении в документе: для элементов это координаты огибающего прямоугольника, определяемые его моделью, а для ветвей — координаты опорных точек (выводов) — первая и последняя точки. Все координаты элементов заданы на сетке с некоторым фиксированным шагом.

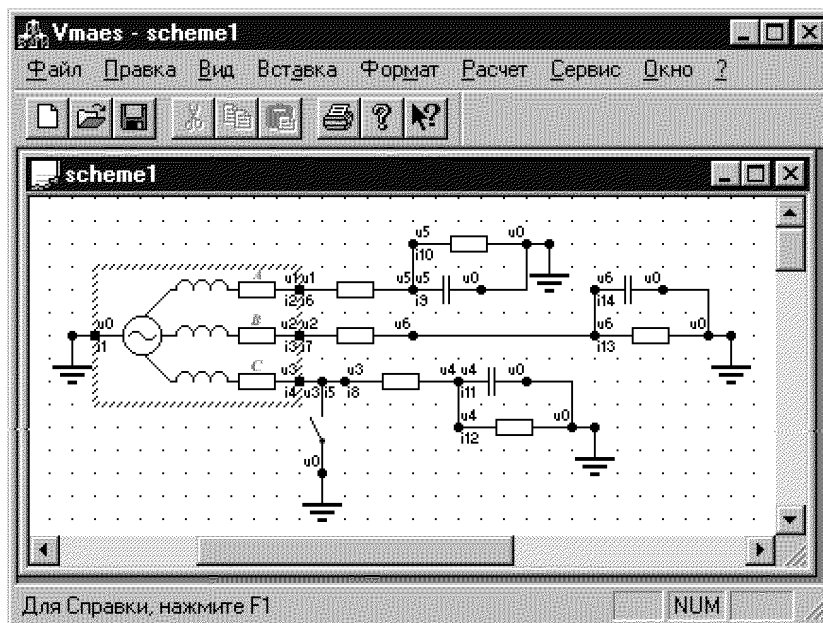


Рис. 2. Рабочий экран интерактивного редактора схем.

Внутри элемента схемы также хранятся указание на соответствующую ему модель и список физических параметров этого элемента. Каждый параметр элемента содержит ссылку на свое имя и пустое или не пустое значение. Параметры могут быть различных типов (целые, вещественные) и размерностей (переменные, одно- и двумерные массивы).

Расчет описывается набором целочисленных и вещественных параметров, а также массивами индексов ветвей и узлов.



Схема обеспечивает построение и хранение *графа соединений элементов*. Вершина этого графа – *узел схемы* – определяется как набор всех точек соединений компонентов схемы, связанных ветвями. *Точка соединения* в свою очередь является набором выводов компонентов схемы с совпадающими координатами. Узел “земля” является выделенным и имеет номер “0”. Схема обеспечивает непрерывную нумерацию узлов.

Каждая модель определяет особенности соответствующих ей элементов:

- название,
- размеры,
- графический образ,
- число и расположение выводов,
- название и тип параметров,
- подпрограмму-надстройку.

Все модели доступны по названию, которое указывается при создании элемента, и должны быть зарегистрированы перед использованием. При отображении схемы осуществляются функции закраски области вывода, вывода сетки, отрисовки элементов схемы, ее ветвей и точек соединения, подписей выводов и выделения активного элемента (или ветви). Функции вставки и удаления узлов и ветвей составляют наименьший полный набор, достаточный для построения схем.

Непрерывная нумерация узлов обеспечивается схемой. При вставке или удалении элемента или ветви (при модификации графа соединений) происходит перенумерация узлов, причем нумеруются только узлы, к которым подсоединены элементы. *Диалоговые окна* задания параметров элемента и параметров расчета схемы являются объектами типа “страница свойств”.

### 3.3. Подсистема управления расчетом

*Подсистема управления расчетом* предоставляет пользователю функции задания параметров расчета и управления расчетом (его запуск и остановка). Она связывает между собой редактор схем и подсистемы вычислений и вывода результатов. Подсистема управления расчетом не имеет собственного окна вывода данных и взаимодействует с пользователем через главное меню и панель инструментов системы VMAES.

При запуске расчета пользователь указывает параметры расчета и данные о схеме, которые передаются *подсистеме вычислений*. В процессе расчета подсистема управления расчетом с некоторым периодом по времени информирует *подсистему вывода результатов* о необходимости обновить окна вывода данных.

### 3.4. Подсистема вычислений

Подсистема вычислений в свою очередь предназначена для выполнения расчета по заданной схеме и в каждый момент времени позволяет проводить только один расчет. Она состоит из следующих блоков:

- подпрограммы-надстройки моделей элементов;
- универсальной подпрограммы расчета параметров схемы;
- низкоуровневого вычислительного блока (собственно подпрограммы моделей элементов).

Подсистема управления расчетом запускает подсистему вычислений в отдельно рабочем потоке, что позволяет пользователю взаимодействовать с программой (через поток

пользовательского интерфейса) в процессе расчета.

Исходная библиотека содержит семь подпрограмм расчета электрических схем. В ходе расчета вычисляются значения токов и напряжений для заданной схемы на заданном временном интервале с заданным шагом. Алгоритм типичного расчета выглядит следующим образом:

- THEM01 – подготовка (инициализация) расчета;
- THEMNJ – проведение расчета (содержит цикл по времени);
- THEMTB – печать текущих результатов;
- THEMPS – расчет одного временного шага (построение и решение системы соответствующих уравнений);
- THEMSS – подготовка данных к уравнениям Кирхгофа;
- THEMGK – построение уравнений Кирхгофа;
- THEMRE – проверка корректности задания схемы (вызывается только один раз);
- THEMSS – построение уравнений для элементов;
- SLM – решение уравнений.

Здесь вложением показаны обращения одних подпрограмм к другим. Подпрограмма THEMSS обращается к подпрограммам моделей элементов, из которых состоит схема, и используется дважды.

При запуске подсистема вычислений использует данные *описания эксперимента*, имеющие следующую иерархию:

- эксперимент
  - параметры эксперимента
    - электрическая схема
      - массив элементов
        - массив ветвей
        - массив узлов
        - массив параметров
        - описание модели.

Все модели элементов, из которых состоит схема, должны быть описаны в программе. Подпрограммы моделей элементов заданы и хранятся в библиотеке подпрограмм. Динамическое подключение подпрограмм моделей элементов обеспечивается подпрограммами-надстройками, которые имеют одинаковые описания (типы). Вызов собственно подпрограмм моделей элементов с соответствующими им параметрами происходит уже внутри этих подпрограмм.

В настоящей реализации системы библиотек подпрограмм моделей элементов, для которых были выполнены подпрограммы-надстройки, выглядят следующим образом:

- THEMES однофазный источник переменной э.д.с.,
- THEMSC конденсатор,
- THEMLR индуктивность и резистор последовательно,
- THEML1 однопроводная длинная линия,
- THEMLI трехпроводная длинная линия,
- THEME3 трехфазный источник переменной э.д.с.,
- THEMRC резистор,
- THEMLC индуктивность,
- THEMK0 отключение (размыкание) в заданный момент времени,
- THEMK1 включение (замыкание) в заданный момент времени,
- THEMFN4 преобразователь координат общего вида  $N \times N$ .

### 3.5. Принципы программной реализации

Принятые авторами принципы программной реализации системы VMAES предусматривали разработку *дополнительных программных компонент*, позволяющих использовать существующий алгоритм расчета для различных схем и параметров эксперимента без перекompиляции программы.

*Подпрограммы-надстройки моделей* принимают на входе фиксированный набор параметров и адаптируют его к соответствующим подпрограммам моделей.

*Подпрограмма схемы* является аналогом упомянутой выше подпрограммы THEMSS, но не содержит фиксированных вызовов подпрограмм моделей, а динамически формирует вызовы к их подпрограммам-надстройкам, используя информацию о схеме.

Для гибкого пополнения моделей элементов используется механизм регистрации моделей.

### 3.6. Подсистема вывода результатов

*Подсистема вывода результатов* предназначена для отображения временных зависимостей электрических характеристик схемы, получаемых в процессе расчета. Она работает в оперативном (отображение результатов в процессе расчета) и автономном (просмотр результатов по окончании расчета) режимах с двумя форматами представления данных:

диаграмма (график зависимости от времени);

таблица (список значений на последовательные моменты времени).

Пользователю доступны следующие функции управления выводом результатов:

создание нового окна вывода (таблицы или диаграммы);

настройка окна вывода (формата и выводимых значений);

вывод результатов на печать (диаграмм).

При этом в одном окне могут выдаваться значения напряжения и тока в различных узлах и ветвях системы. Выводимые величины задаются в соответствующем диалоговом окне их выбором из списка всех доступных результатов. В процессе расчета окна вывода результатов обновляют содержимое с некоторым периодом (в настоящее время этот период фиксирован и равен 0.2 с), что несколько замедляет расчет, но позволяет отслеживать динамику процесса.

Одновременно с выводом диаграммы выполняется автоматическое масштабирование результатов. Масштабирование по *оси напряжения* и *оси тока* происходит независимо друг от друга. При форматировании диаграммы задается ее *заголовок* и *подпись*. Под диаграммой располагается *легенда*, указывающая цвета линий для выводимых значений. При выводе на печать диаграмма размещается на половине страницы при ее вертикальном расположении и на всей странице при горизонтальном.

В качестве примера на рис. 3 приведены фрагменты окон вывода результатов моделирования короткого замыкания.

При обновлении таблицы результатов увеличивается число строк (элементов), но для уменьшения вычислительных затрат прокрутки окна не происходит. Пользователь может воспользоваться прокруткой для перемещения по таблице.

## 4. Заключение

Дальнейшие пути развития системы VMAES предполагают совершенствование методов взаимодействия пользователя с системой. Одновременно планируется создать открытый стандарт, который позволит использовать в схемах компоненты, созданные независимыми разработчиками.

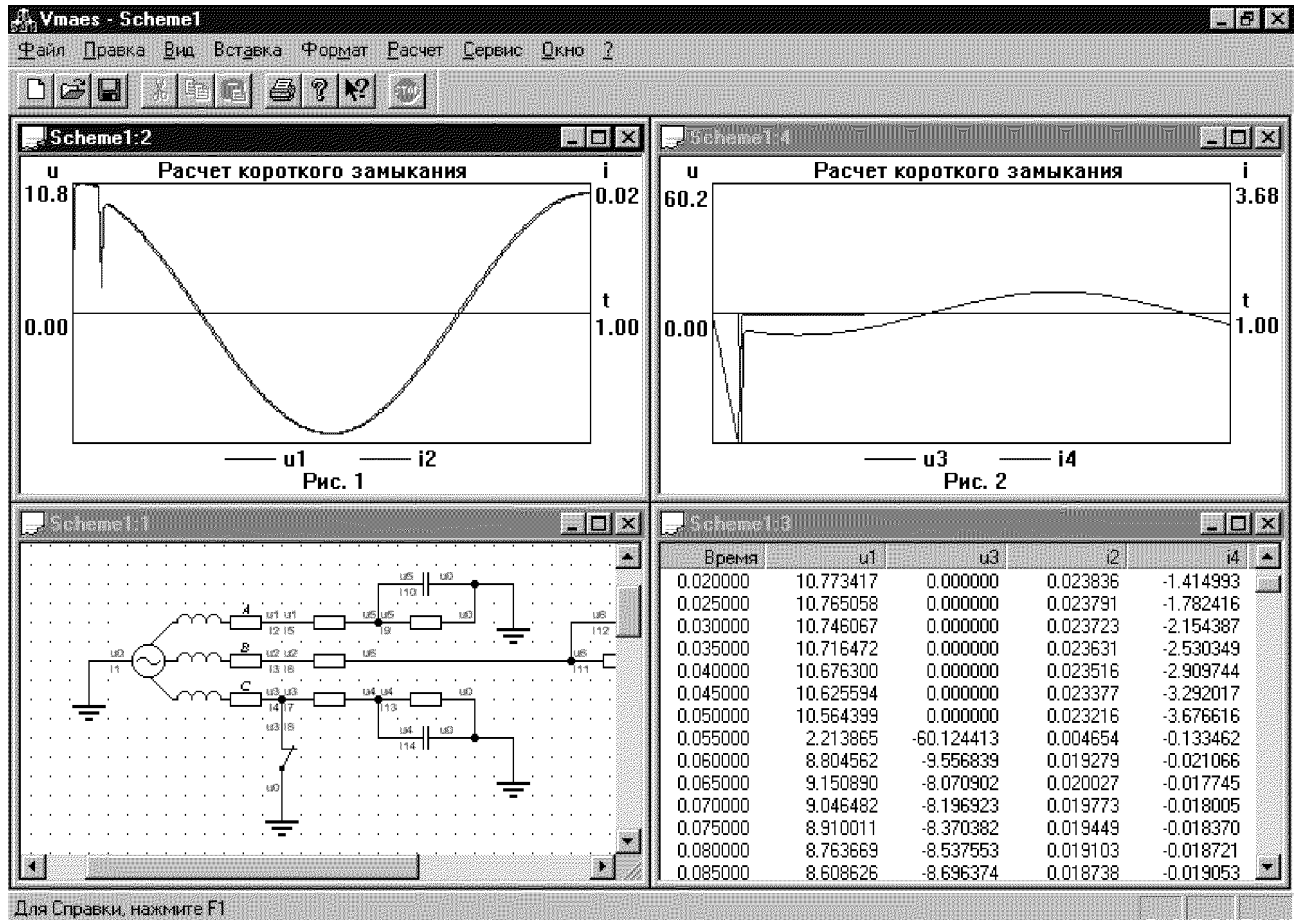


Рис. 3. Фрагменты окон вывода результатов короткого замыкания.

## Список литературы

- [1] АРАЙС Е. А., ДМИТРИЕВ В. М. Прямое моделирование цепей общего вида на ЭВМ. *Изв. ВУЗов. Сер. Радиоэлектроника*, **24**, №1, 1981, 3–8.
- [2] ЧУА Л. О., ЛИН ПЕН-МИН. Машинный анализ электронных схем. *Алгоритмы и вычислительные методы*. Энергия, М., 1980.
- [3] АРАЙС Е. А., АРАЙС Л. А., ДМИТРИЕВ В. М. *Алгоритмы и программы анализа сложных цепей и систем*. Изд-во Томского гос. ун-та, 1976.
- [4] КОСТЕНКО М. В., ПЕРЕЛЬМАН Л. С., ШКАРИН Ю. П. *Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения*. Энергия, М., 1973.
- [5] ВЕНИКОВ В. Л. *Переходные электромеханические процессы в электрических системах*. Высшая школа, М., 1978.
- [6] НОВИКОВ О. Я. *Устойчивость электрической дуги*. Энергия, Л., 1978.
- [7] ЛЕВИНШТЕЙН М. Л. *Операционное исчисление в задачах электротехники*. Энергия, Л., 1972.

- [8] Долгинов А. И., Левина Л. С., Ступель А. И., Шатин В. С. *Расчет переходных процессов в электрических системах на ЭЦВМ*. Энергия, М., 1968.
- [9] Бурдуковская В. П., Ковалев Б. И., Милевский А. К. Комплекс программ для расчета на ЦВМ БЭСМ-4 и М-220 восстанавливаемых напряжений на контактах выключателей. *Электромагнитные переходные процессы в электрических системах*. Тр. СибНИИЭ, вып. 31, 1976.
- [10] Щербачев О. В., Зейлигер А. Н., Кадомская К. П. и др. *Применение цифровых вычислительных машин в электроэнергетике*. Энергия, Л., 1980.
- [11] Гавриков В. И., Гамилко В. А., Линднер Б. Применение цифровых фильтров для моделирования на ЭВМ деформации электромагнитных волн в линиях электропередач. Тр. Ленинградского политехн. ин-та, **369**, 1980, 52–55.

*Поступила в редакцию 6 ноября 1997 г.  
в переработанном виде 20 февраля 1998 г.*