

Разработка и реализация информационно-вычислительной системы для исследования динамической устойчивости электроэнергетических систем

Д. Б. Попов

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия
e-mail: popov@isem.sei.irk.ru

The issues of data-computing system development for numerical simulation and analysis of electro-mechanic transients in electric power systems are considered. Requirements to system and functional filling of the system are formulated. Instrumental features of the developed software, classes structure and a way for practical implementation of them are discussed.

Введение

Устойчивость электроэнергетических систем (ЭЭС) опирается на общую теорию устойчивости движения [1], которая изучает влияние возмущающих факторов на движение любой материальной системы. В ЭЭС параметрами движения являются мощности генераторов и нагрузок, токи, напряжения, частота вращения роторов электрических машин, взаимные углы между одноименными осями роторов и пр. Движение называют устойчивым, если оно мало изменяется под действием возмущающих факторов, в противном случае движение неустойчиво. Под динамической устойчивостью понимается способность ЭЭС возвращаться к установившемуся режиму после значительных возмущений без перехода в асинхронный режим.

При анализе динамической устойчивости ЭЭС приходится рассматривать многообразные электромеханические переходные процессы, обусловленные возможностью возникновения возмущений в любых элементах ЭЭС и различной степенью их влияния. Для полного анализа и выбора противоаварийных мероприятий необходимо было бы выполнять расчеты переходных процессов при всех возмущениях во всех элементах ЭЭС. Однако на основании результатов расчетов наиболее характерных случаев, анализа аварийных ситуаций в реальных условиях и понимания физической сущности переходных процессов возможно ограничение числа рассматриваемых возмущений и точек их приложения.

Таким образом, расчеты переходных процессов не только преследуют цели получения оценок динамической устойчивости для заданной группы исходных режимов и

расчетных возмущений. Они также дают исходный материал для всестороннего осмысления процессов, который необходим при выборе эффективных противоаварийных мероприятий.

В самом упрощенном виде задача численного исследования поведения ЭЭС в переходном процессе сводится к моделированию динамики ее элементов, которая описывается системой уравнений, решаемой численными методами. Для интегрируемых переменных должны быть известны их значения в начальный момент переходного процесса, которые определяются из расчета исходного (установившегося) режима. Для решения системы дифференциальных уравнений применяются различные методы интегрирования. Правильность расчетов переходных процессов зависит от используемых моделей и эффективности метода, которым осуществляется в программе интегрирование дифференциальных уравнений.

Современную технологию разработки программного обеспечения предоставляют средства объектно-ориентированного программирования. Его отличительные черты состоят в прозрачности и возможности доступа к деталям реализации конкретного метода и алгоритма, математической ясности описания нового метода для разработчика и пользователя, открытости и возможности дополнения новых процедур, а также простоте использования разработанных методов.

Инкапсуляция методов в классах математических объектов способствует повышению наглядности применяемых численных методов и корректной работе с данными объектов без нарушения их целостности. Особенно это относится к динамически размещаемым данным математических объектов, в частности к векторным и матричным объектам.

1. Функциональное наполнение информационно-вычислительной системы

Численное моделирование электромеханических переходных процессов подразумевает построение расчетной модели, подготовку данных, дискретизацию модельных уравнений, решение системы уравнений и обработку полученных результатов [2]. Данная схема не является простой последовательностью перечисленных действий.

Системное и функциональное наполнение информационно-вычислительной системы (ИВС), предназначенной для численного моделирования и анализа электромеханических переходных процессов в ЭЭС, поясняет рис. 1.

Математическая модель ЭЭС — это динамическая многомашинная система. При моделировании электромеханических переходных процессов модели ЭЭС можно разделить на два класса, которые связаны между собой набором общих переменных: модели электрической сети, расчеты потокораспределения в которой выполняются на каждом шаге интегрирования, и модели синхронных машин.

Математические модели машин переменного тока должны учитывать эффект вытеснения токов в контурах ротора, представляя ротор либо многоконтурной системой (на основе синтеза постоянных параметров), либо двухконтурной (с переменными параметрами эквивалентного контура).

Синхронные и асинхронные машины представляются дифференциальными уравнениями во вращающихся ортогональных осях (d и q), жестко сцепленных со “своими” роторами. Это позволяет полно учесть электромагнитные и электромеханические свой-

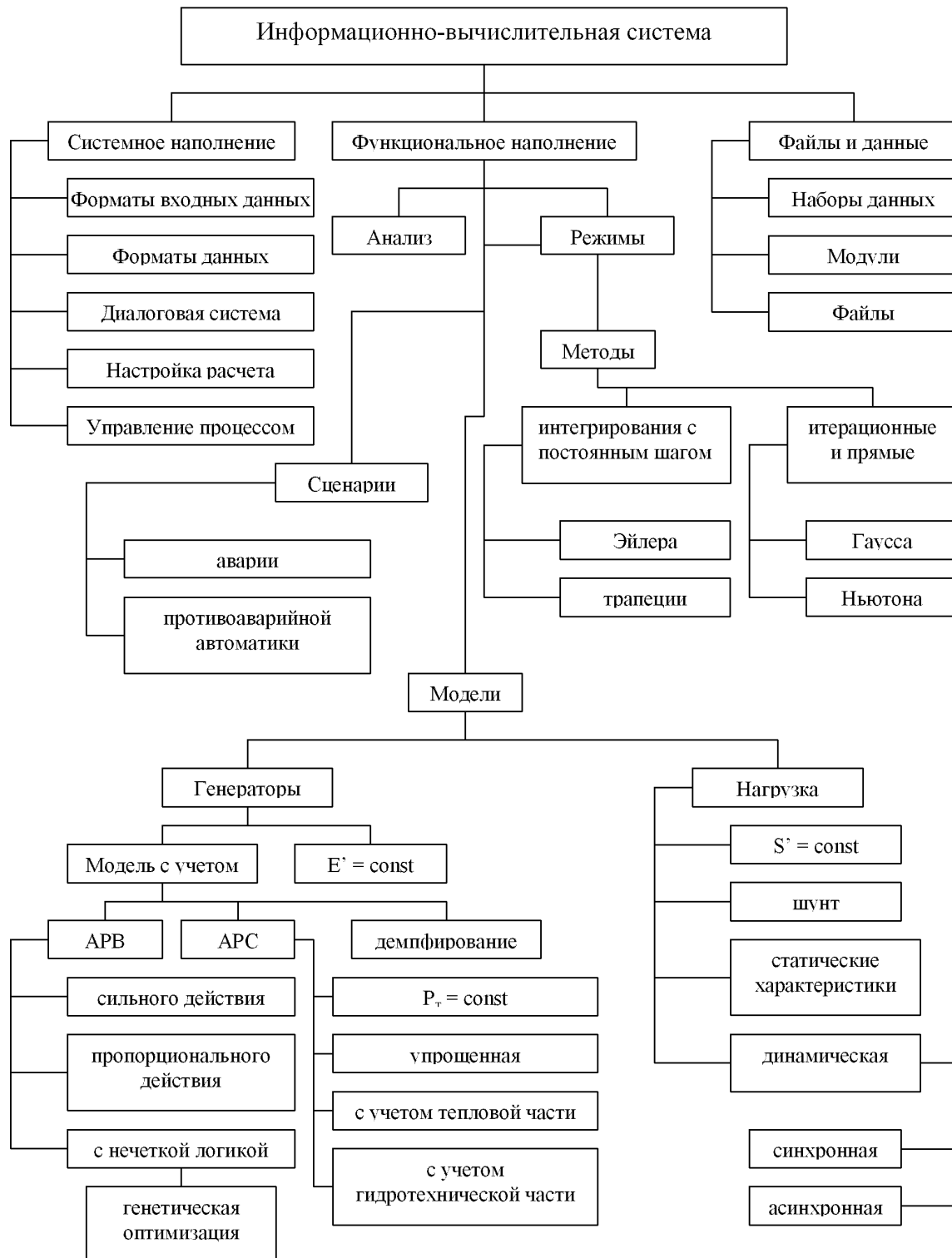


Рис. 1. Системное и функциональное наполнение ИВС для численного моделирования и анализа электромеханических переходных процессов

ства их роторов. В состав системы уравнений включаются уравнения первичных двигателей (турбин и механизмов), возбудителей синхронных машин и регуляторов (АРВ и АРС). Уравнения учитывают инерционность динамических элементов, ограничения

по некоторым параметрам и логику работы управляющих автоматических устройств. Автоматические устройства можно разделить на локальные устройства, изменяющие внутреннее состояние этого элемента на основе изменения локальных параметров, и устройства системной автоматики, отслеживающие изменения в ЭЭС и работающие на предотвращение аварийных ситуаций или на выход из аварий к устойчивому движению.

Математические модели регуляторов возбуждения генераторов должны учитывать их многоканальность, ограничительные характеристики каналов и допустимые коэффициенты регулирования. Необходимо учитывать регулирование частоты вращения роторов паровых и газовых турбин, а также динамические характеристики источников энергоносителей.

Нагрузки ЭЭС представляются упрощенно — постоянной проводимостью или мощностью, обобщенно — статическими характеристиками и моделями асинхронных двигателей с типовыми параметрами (однако можно учитывать и одиночные двигатели с заводскими параметрами).

В модели ЭЭС одна из синхронных машин принимается за базовую, в координатах осей которой рассчитываются остальные. Сетевые элементы, включая эквивалентные системы, моделируются в осях базовой машины. Математические модели остальных машин, в том числе асинхронных двигателей, сопрягаются с моделью ведущей машины с помощью динамических преобразователей координат.

Динамическая модель ЭЭС должна адекватно и с приемлемой точностью отражать натуральные процессы и режимы электрооборудования и позволять задать любую комбинацию синхронных генераторов и эквивалентных асинхронных двигателей при любой начальной загрузке, а также сопрягать синхронные генераторы с любыми (типовыми) системами возбуждения и регулирования скорости. Работа с моделью предусматривает:

- выбор электрической схемы электросети;
- выбор генераторов по каталогу локальной базы данных;
- выбор системы возбуждения генератора;
- учет электродвигательной и обобщенной нагрузки;
- ввод и изменение параметров электрооборудования сети;
- расчет параметров схем замещения электрической системы;
- расчет эксплуатационных и аварийных режимов.

Математические модели ЭЭС должны позволять изменять расчетные условия, а также параметры сети, машин и регулирующих устройств с целью оценки степени их влияния на те или иные характеристики, используемые при проектировании, анализе режимов, наладке и эксплуатации электрооборудования.

Режимы. Установившийся доаварийный режим ЭЭС задает значения параметров в начальной точке моделирования переходного процесса. Для анализа динамической устойчивости используют набор доаварийных и послеаварийных режимов, отражающих различные режимы работы ЭЭС.

Методы интегрирования. Для расчета режима на шаге интегрирования используются прямые и итерационные методы Гаусса и Ньютона, выбираемые автоматически в зависимости от выбранных моделей и условий сходимости расчета. Для интегрирования дифференциальных уравнений с постоянным шагом используются методы Эйлера и трапеций.

Сценарии. Сценарии описывают возмущения в элементах энергосистемы, включая как аварийные воздействия, нарушающие работу энергосистемы, так и работу противоаварийной автоматики, направленную на обеспечение динамического перехода в новую

точку устойчивой работы системы, соответствующую приемлемому послеаварийному режиму.

Анализ. Для анализа динамической устойчивости необходим удобный блок визуализации с широкими возможностями структурирования информации как по элементам, так и по расчетным сериям. Это позволит быстро и наглядно исследовать или прогнозировать режимы работы электростанций разного типа и любой мощности при их проектировании, наладке и эксплуатации.

2. Программная реализация информационно-вычислительной системы

Развитие ИВС осуществляется в основном не за счет замены имеющихся модулей на их более совершенные версии, а за счет расширения и включения в систему новых модулей, отражающих различные модели ЭЭС и методы для их обработки, добавляемые в ходе развития ИВС.

Объекты. В качестве основы объектной реализации программного обеспечения рассматриваются математические объекты, вычислительные алгоритмы объектов и алгоритм моделирования переходного процесса [3].

Математический объект представляет собой сущность, выражающую некоторую математическую категорию и составляющую объект вычислений. В качестве объектов рассматриваются элементы энергосистемы, векторы и матрицы. Каждый математический объект обладает набором математических признаков, однако сами по себе они не составляют вычислительной задачи и являются инструментальным средством для ее решения [4].

При реализации классов методы привязываются к каждой структуре данных, а их виртуальное использование переносится на абстрактный уровень. В этом случае, используя вызовы виртуальных методов, сложные организованные вычислительные процессы реализуются на самых верхних уровнях классовой иерархии. При обращении к виртуальным методам иерархии по указателям на объекты базового класса вызываются методы тех классов, на объекты которых они на самом деле указывают.

Под вычислительными алгоритмами объектов понимаются методы вычислительной математики и вспомогательная информация, определяющая условия их алгоритмического использования. Каждый алгоритм предназначен для решения одной проблемы, однако может использоваться как подзадача для решения других задач.

Алгоритм моделирования переходного процесса в простейшем случае представляет собой сценарий последовательных вызовов вычислительных алгоритмов и включает в себя вызов алгоритмов решения системы алгебраических и дифференциальных уравнений, а также отслеживает корректность и эффективность используемых расчетных алгоритмов в текущей расчетной ситуации.

Классы. Для данной предметной области система классов построена по принципу иерархической детализации. Свойства объектно-ориентированного программирования, такие как инкапсуляция, наследование и полиморфизм, отражаются на элементах энергосистемы и их взаимосвязях.

Объекты-данные соответствуют понятиям предметной области и иерархически упорядочены в соответствии с уровнем абстракции, выделенной при декомпозиции области. Объекты-операции хранятся в контейнере операций, который представляет собой мно-

госвязный граф. Связи в этом графе отражают отношения использования. Объекты-данные возникают в результате выполнения операций порождения данного объекта и могут использоваться только через соответствующие операции порождения.

Классы, реализующие работу с динамическими структурами данных, а также с одномерными и двумерными массивами данных, оформляются в виде соответствующих обобщенных классов, что позволяет использовать их в предметных модулях прикладной программы.

Классы векторов и матриц предназначены для хранения информации о характеристиках элементов ЭЭС. Интерфейсы этих классов представляют набор методов в форме перегружаемых операторов. Класс динамических массивов осуществляет хранение значений элементов любой размерности и реализует методы изменения размерности, заполнения, сортировки и присваивания. Класс векторов наследует все свойства динамических массивов и определяет операции линейной алгебры. Класс двумерных матриц дополнительно реализует вычисление определителя и получение обратной матрицы.

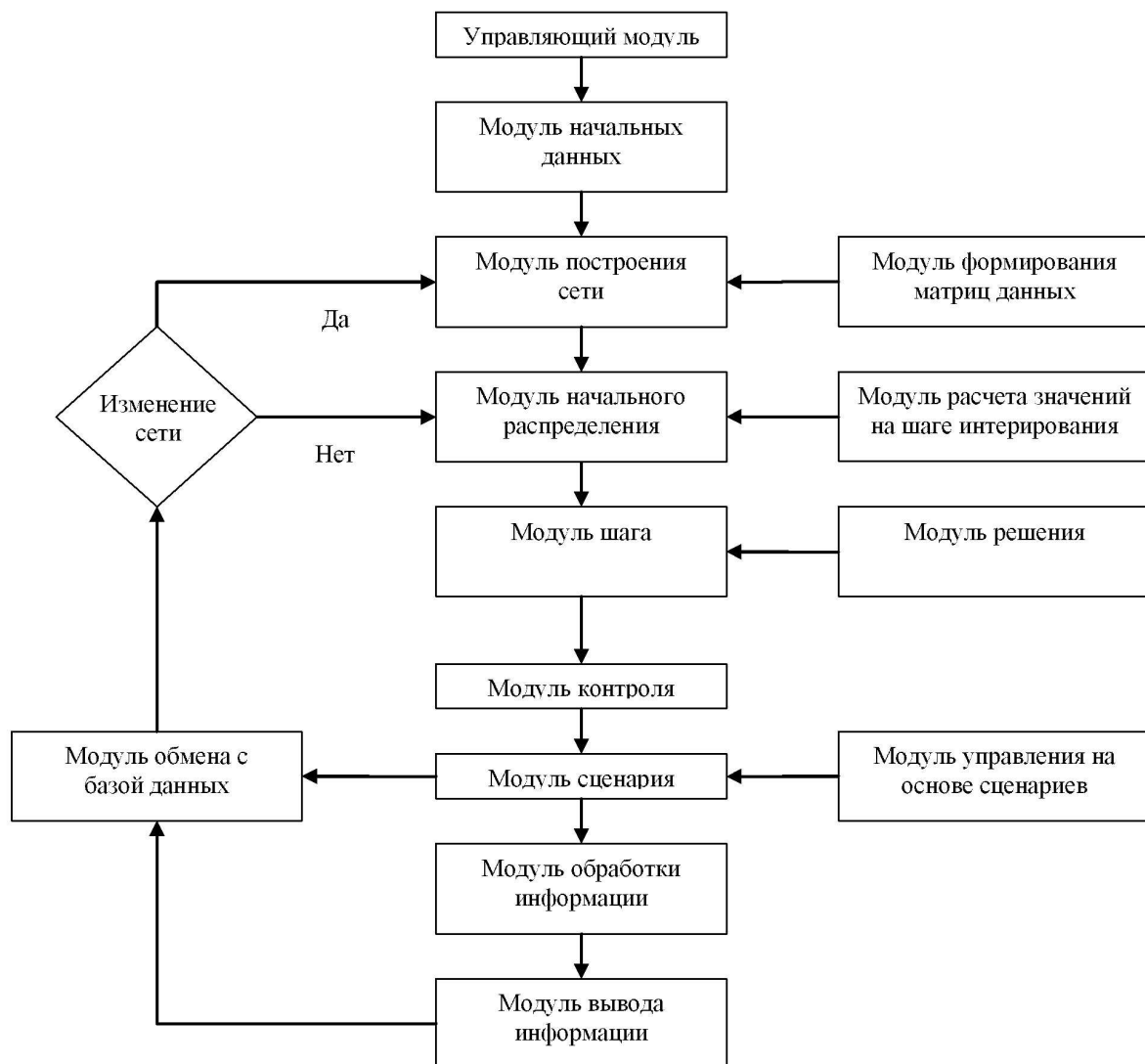


Рис. 2. Структурно-функциональная схема решения задачи

Классы алгоритмов предназначены для проверки корректности объектов и установки необходимых связей между ними, а также для управления шагами решения задачи и определения последовательности операций.

Сценарии реализуют алгоритмы расчетов переходного процесса путем последовательного вызова виртуальных методов соответствующих классов. Схема структурно-функционального алгоритма представлена на рис. 2.

Функциональные подсистемы. В соответствии с функциональным назначением в системе выделяется три основные подсистемы: подсистема подготовки данных, подсистема управления расчетом, подсистема визуализации и анализа полученных данных. Подсистемы включают в себя следующие компоненты, представленные на рис. 3.

1. *Подсистема подготовки данных.* Определение начальных значений параметров установившегося режима и определение моделей элементов энергосистемы.

- Задание начальных значений на основе установившегося режима.
- Задание элементов энергосистемы с их моделями и коэффициентами.
- Задание сценария моделирования переходного процесса.
- Задания сценариев противоаварийной автоматики и контролируемых параметров для запуска этих сценариев.



Рис. 3. Функциональные подсистемы и их взаимодействие

2. Подсистема управления процессом моделирования.

- Допускается внесение изменений на шаге интегрирования согласно заданному сценарию моделирования.
- Допускается запуск сценариев противоаварийной автоматики по условию изменения контролируемых значений.

3. *Подсистема визуализации результатов.* Табличное и графическое представление выбранных наборов данных для анализа динамической устойчивости.

Наборы данных, необходимые для численного моделирования электромеханических переходных процессов, показаны на рис. 4. Вводимые и расчетные данные хранятся в базе данных SQL-сервера, которые можно редактировать и печатать. В базе данных фиксируются основные установки: по состоянию расчетной схемы, параметрам электрооборудования, стандартным назначениям, расчетным условиям, сообщениям и т. д. Считается, что ИВС работает в пакетном режиме, графический интерфейс не используется. Файл сценария содержит информацию, необходимую для расчета, в частности имена наборов данных по режимам, генераторам, возмущениям и работе противоаварийной автоматики.

Архитектура ИВС [5] для расчета электромеханических переходных процессов (ПАУ-Windows) показана на рис. 5 в виде функциональных блоков и функциональных и информационных связей между ними.

Главным модулем ПАУ-Windows является исполняемый модуль ПАУ-Manager. С точки зрения пользователя, главный модуль представляет собой автоматизированное рабочее место, оснащенное соответствующим графическим пользовательским интерфейсом, через который осуществляются формирование задания и управление расчетом. С функциональной точки зрения ПАУ-Manager является центром информационной системы, осуществляющим вызов всех функциональных и сервисных модулей.

С информационной точки зрения центр информационной системы — база данных, обслуживаемая сервером, который принимает от функциональных модулей запросы на обработку данных. Сервер и обслуживаемая им база данных — это единый центр комплекса вне зависимости от числа пользователей. Здесь реализована обычная идеология клиент-сервер.

Связь главного модуля с SQL-сервером осуществляется через модули доступа к данным, которые реализуют необходимые интерфейсы для обработки и редактиро-

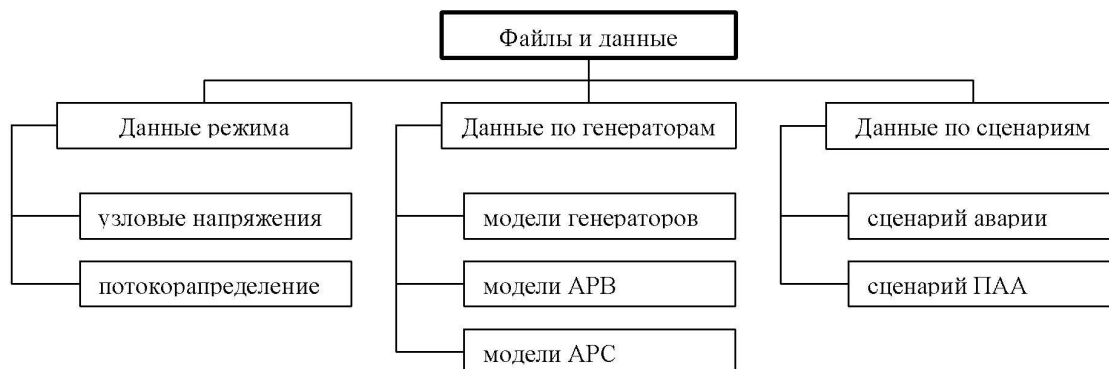


Рис. 4. Наборы данных, необходимые для численного моделирования электромеханических переходных процессов

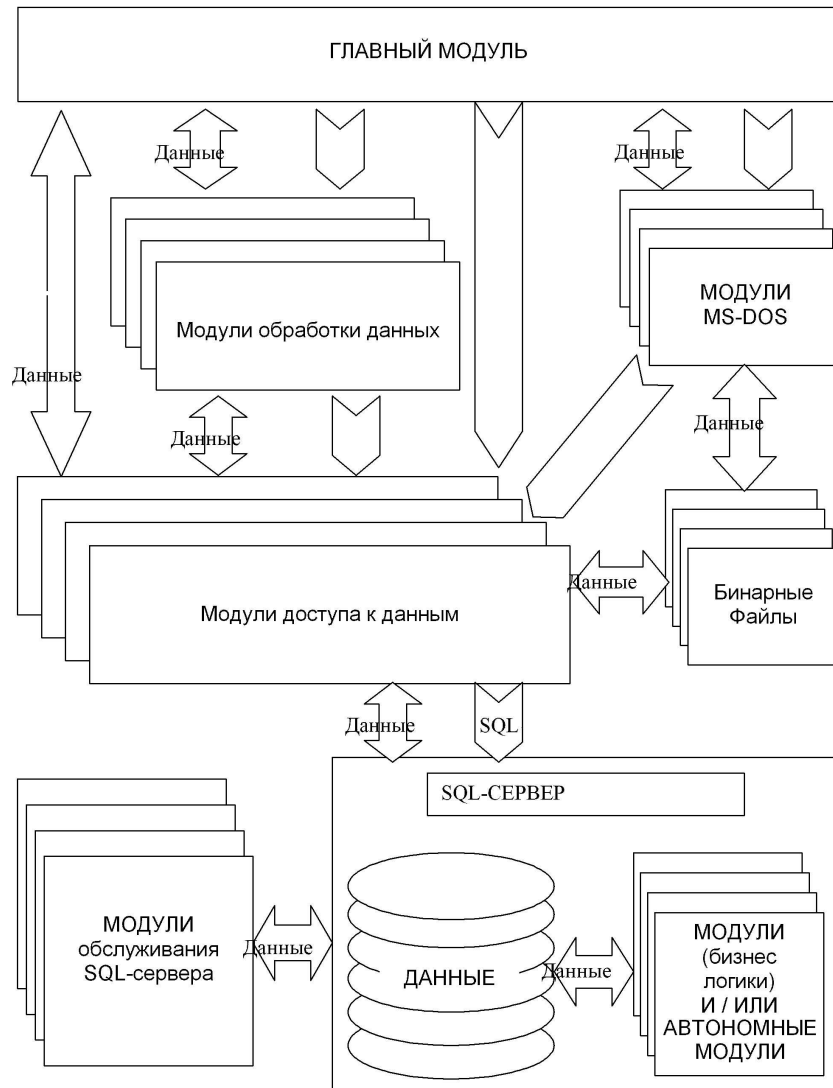


Рис. 5. Архитектура ИВС ПАУ-Windows в виде функциональных блоков и функциональных и информационных связей между ними

вания данных. Модули доступа к данным также обеспечивают двухстороннюю работу с бинарными файлами, что необходимо для доступа к архивам накопленных на MS-DOS версий программного обеспечения, а также для использования расчетных модулей MS-DOS.

Заключение

Описаны особенности построения и основные концептуальные положения, принятые при реализации ИВС для исследования динамической устойчивости электроэнергетических систем. Приводятся системное и функциональное наполнение ИВС, структура организации классов и подход к их практической реализации.

Применение данного подхода позволяет построить информационно-вычислительную систему, к которой предъявляются повышенные требования по расширяемости, модифицируемости и масштабируемости.

Список литературы

- [1] ГУРЕВИЧ Ю.Е., ЛИБОВА Л.Е., ОКИН А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1990.
- [2] ГОРЕВ А.А. Переходные процессы синхронной машины. М.: Госэнергоиздат, 1950. 552 с.
- [3] ПОПОВ Д.Б. Разработка программного обеспечения в научных подразделениях // Компьютерное моделирование-2007: Тр. Междунар. научно-техн. конф., СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. С. 250–258.
- [4] BUCKNALL J. Tomes of Delphi: Algorithms and Data Structures. Texas: Wordware Publ., Inc., 2001.
- [5] ЕФИМОВ D.N., РОРОВ D.B. Open system for simulation of transients in electric power systems // ICEE. 2001. Vol. 1. Xi'an/China. P. 233–237.

Поступила в редакцию 25 января 2008 г.