

Комитет науки Министерства образования и науки
Республики Казахстан
РГП «Институт информационных и вычислительных технологий»
КН МОН РК



25 лет
Независимости
Республики Казахстан



25 лет
Институту
информационных и
вычислительных
технологий

МАТЕРИАЛЫ

Международной научной конференции
«Информатика и прикладная математика»
(«Computer science and Applied Mathematics»),
посвященной 25-летию Независимости Республики Казахстан и
25-летию Института информационных и
вычислительных технологий

Часть II

г. Алматы, 21-24 сентября 2016 года

Алматы
2016

РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Калимолдаев М.Н., Абдилдаева А.А., Мамырбаев О.Ж.,
Дузбаев Т., Тойбаева Ш.
e-mail: abass_81@mail.ru

Институт информационных и вычислительных технологий КН МОН РК,
Алматы, Казахстан

Аннотация. В данной статье рассматриваются объекты информационной системы для электроэнергетических систем и подробная схема информационной системы для ЭЭС. Рассматриваются математические модели электроэнергетических систем. На основе математической модели приводится конкретный пример, который показывает достаточную эффективность предложенного метода. В настоящее время к основным областям применения систем передачи данных можно отнести системы релейной защиты и автоматики, диспетчерского и автоматизированного технологического управления электроэнергетическими объектами, а также системы автоматизированного учета энергоресурсов. Автоматическое регулирование возбуждения (АРВ) синхронных машин является одним из наиболее эффективных способов обеспечения устойчивости работы энергосистем. Однако, многообразие возможных параметров и режимов даже в отдельно взятой энергосистеме создают значительные препятствия на пути разработки оптимальных средств обеспечения устойчивости. Таким образом, применение АРВ для обеспечения устойчивости в ряде случаев может оказаться недостаточным. Поэтому, появляется необходимость в разработке информационных систем.

Введение

В настоящее время, с развитием высокопроизводительных средств вычислительной техники, информационные системы являются эффективным средством решения системных проблем. Вопросам применения информационной системы в системном анализе посвящены работы М.К.Чиркова, С.П.Маслова, В.Н.Петрова, Д.Марка, К.МакГоуэна [1-3]. Вопросы разработки информационных систем различного назначения методами системного анализа с применением современных объектно-ориентированных языков программирования и технологий баз данных широко освещены в трудах Г.Шилдта, Ч.Петцольда, Дж.Рихтера, В.В.Кульбы, Г.Хансена, Т.Конолли, Д.Майо, М.Лутцем, В.В.Воронова, А.Г.Мамиконова, Т.Хальпина, Т.Моргана [4-9] и других. В меньшей степени это коснулось проблем создания специальных информационных систем для электроэнергетических комплексов.

Отдельные аспекты посвященные созданию и развертыванию информационных систем электроэнергетических комплексов для технологий Smart Grid рассмотрены в работах Б.Б.Кобеца, И.О.Волковой, Б.Ф.Вайнзихера [10] и др.

Базовой основой любой информационной системы является модель данных, описывающая основные элементы системы и предметной области.

Программно-технические средства информационной системы - совокупность информационных технологий, которая включает программные и технические средства информационной системы электроэнергетических комплексов, предназначенных для автоматизации процессов сбора, обработки информации, хранения информации, обеспечения доступа к ней, ее предоставления и распространения.

В настоящее время к основным областям применения систем передачи данных можно отнести системы релейной защиты и автоматики (РЗА), диспетчерского и автоматизированного технологического управления электроэнергетическими объектами (АСТУ), а также системы автоматизированного учета энергоресурсов.

На современном этапе развития системных методов разработки информационной системы существует устойчивая тенденция создания унифицированных моделей данных: информационные системы построенные по такому принципу, обладают большими возможностями интеграции с другими подобными системами, могут организовываться в распределенные сети. Одним из основных методических средств построения моделей данных предметных областей является объектно-ориентированный анализ и его языковая интерпретация - унифицированный язык моделирования UML. Методика построения UML - моделей достаточно подробно рассмотрена в работах Г.Буча, Д.Рамбо, А.Джекобсана, М.Блаха, М.Фаулера, К.Скотта, К.Лармана, Д.Шмуллера, А.В.Леоненкова [11] и др. Комплексы UML-моделей данных предметной области объединяются в единые информационные модели, содержащие исчерпывающую информацию о статических и динамических свойствах системы. В области электроэнергетики существует базовая информационная модель, которая описывает модели данных для информационных систем электроэнергетических объектов.

Мировой опыт

Сегодня в области мировой электроэнергетики происходит настоящая революция. В США, Китае, Японии, Европе полным ходом идет процесс внедрения «интеллектуальных сетей» - Smart Grid .

Минэнерго США определяет интеллектуальную сеть как полностью автоматизированную систему, обеспечивающую двусторонний поток электроэнергии и информации между энергообъектами повсеместно.

Евросоюз дает следующее определение. Smart Grid – это электрические сети, удовлетворяющие требованиям энергоэффективного и экономичного функционирования энергосистемы за счет скоординированного управления и при помощи двусторонних коммуникаций между элементами электросети, электростанциями, аккумулирующими источниками и потребителями.

Основными принципами, на которых базируется технология «Smart Grid» являются наблюдаемость, автоматизация, контролируемость, интеграция.

По общему правилу, концепция Smart Grid включает в себя следующие элементы:

- обеспечение автоматизированного учета энергоресурсов;
- интеллектуальная защита;
- включение в сеть распределенной генерации энергии альтернативных источников;
- использование электромобилей.

На сегодняшний день наиболее активно технология Smart Grid развивается и распространяется в Дании. Это связано с тем, что в этой стране значительное количество энергии поступает из альтернативных источников (20% от общего объема энергии составляет ветряная).

В некоторых штатах США проводились исследования по вводу "интеллектуальных" сетей. В результате снизились пиковые нагрузки на электросеть. В среднем на 10% уменьшились счета за электричество, при этом его стоимость увеличилась на 15%.

Однако, в сравнении с другими державами, США находится на втором месте по капиталовложениям в Smart Grid. На первом месте – Китай, на третьем – Япония.

В России и Казахстане наблюдается повышенный интерес к рассматриваемой технологии. Для обозначения данной технологии используется термин «активно-адаптивная сеть», которую определяют, как технологию самодиагностики, анализа и контроля, созданную для повышения надежности работы оборудования, возможности контролировать его на расстоянии.

По мнению экспертов, на первом этапе в России и Казахстане возможна реализация только принципов наблюдаемости, автоматизации. Это означает, что, в первую очередь, будут внедрены информационные технологии.

За внедрению электрическими сетями ОА «Кегос». АО «KEGOC» как Системный оператор обеспечивает надежность функционирования ЕЭС Казахстана и оказывает системные услуги по передаче электроэнергии, ее диспетчеризации, услуги по организации балансирования производства/потребления электроэнергии. При этом тарифы на услуги АО «KEGOC», как субъекта естественной монополии, регулируются АРЕМ РК.

Однако, проводимые мероприятия больше направлены на техническое перевооружение объектов электроэнергетики, модернизацию основных фондов. Но нужно понимать, что Smart Grid - это концепция инновационного преобразования электроэнергетики в целом, а не отдельных ее функциональных или технологических сегментов

Необходимо отметить, что единой идеологии и понимания ожидаемых эффектов от внедрения Smart Grid в Казахстане пока что нет.

Постановка задачи

Рассмотрим общую математическую модель для электроэнергетических систем.

Пусть управляемая динамическая система состоит из взаимосвязанных l - подсистем и уравнения возмущенного движения имеют вид:

$$\frac{d\dot{\delta}_i}{dt} = S_i, \quad i = \overline{1, l} \quad (1)$$

$$\frac{dS_i}{dt} = w_i - K_i S_i - f_i(\delta_i) - \psi_i(\delta_i), \quad w_i = C_i^* x_i, \quad i = \overline{1, l}$$

$$\frac{dx_i}{dt} = A_i x_i + q_i S_i + b_i u_i + R_i(S_i, x_i), \quad i = \overline{1, l} \quad (2)$$

где δ_i - угловые координаты; S_i - угловые скорости; $x_i - n_i$ - вектор состояния регулятора; w_i - управление воздействия на объекты управления; $K_i > 0$ - коэффициенты демпфирования объекта управления; C_i, q_i, b_i - постоянные n_i - мерные векторы для каждого i ; A_i - постоянная матрица порядка $n_i \times n_i$; A_i - управляющее воздействие регулятора, сформированное по принципу обратной связи; функции

$$\psi_i(\delta_i) = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^l p_{ik}(\delta_{ik}), \quad \delta_{ik} = \delta_i - \delta_k, \quad i = \overline{1, l} \quad (3)$$

характеризуют влияния на i -ую подсистему, остальных $l - 1$ подсистем; $f_i(\delta_i)$ - непрерывно дифференцируемые периодические функции, удовлетворяющие условиям:

$$f_i(\delta_i) = f_i(\delta_i + 2\pi), \quad \forall \delta_i \in E^1, \quad \gamma_{0i} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f_i(\delta_i) d\delta_i \leq 0,$$

$$f_i(0) = 0, \quad \left. \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i} \right|_{\delta_i=0} > 0, \quad f_i(\delta_{0i}) = 0, \quad \left. \frac{df_i(\delta_i)}{d\delta_i} \right|_{\delta_i=\delta_{0i}} < 0, \quad 0 < \delta_{0i} < 2\pi, \quad i = \overline{1, l}$$

Для каждого фиксированного i дифференциальные уравнения второго порядка (1) описывают процессы в i -м объекте управления (всего объектов управления l), а векторное дифференциальное уравнение (2) определяет уравнение движения регулятора i -го объекта управления.

В частности, для электроэнергетических систем управления уравнения (1) описывают вращательное движение ротора i -го синхронного генератора, величина $\dot{\delta}_i$ - разность углов вращения ротора при номинальной частоте и электродвижущей силой вырабатываемой i -генератором в относительных единицах, функция $f_i(\dot{\delta}_i)$ определяет мощность i -го генератора в относительных единицах, $\psi_i(\dot{\delta}_i)$ - выражают взаимные влияния генераторов друг на друга через общую электрическую линию.

Уравнения (2) описывают динамику парового котла, паровой турбины автоматического регулятора частоты вращения и системы возбуждения i -го генератора, w_i - воздействия, вырабатываемые регулятором для стабилизации вращательного движения ротора i -генератора, u_i - управления, вырабатываемые ЭВМ с целью обеспечения синхронной работы всех генераторов, работающих на общую электрическую сеть.

Рассмотрим некоторые механические и электромеханические системы управления.

На рис.1 приведена структурная схема энергосистемы, где ЭВМ - электронно-вычислительная машина для экономичного распределения нагрузок, K - котёл, PK - регулятор котла, $APЧВ$ - автоматический регулятор частоты вращения, T - турбина, Γ - генератор, CB - система возбуждения, l - число генераторов.

С генератором связаны три независимые системы управления. Первая из них - это система возбуждения, которая регулирует напряжение на шинах генератора. Вторая система - это система регулирования, которая контролирует частоту вращения турбины и определяет механическую мощность P_T . Третья - центральная система управления, с помощью которой устанавливается соответствие между генерацией и нагрузкой и обеспечивается синхронная работа генераторов после аварийной ситуации с помощью управляющих воздействий $w_1(t), \dots, w_c(t)$.

Генераторы $\Gamma-1, \dots, \Gamma-l$ связаны через общую электрическую сеть и нагрузки. Уравнения возмущённого движения i -генератора в классической модели энергосистемы [13] имеют вид:

$$\frac{d\dot{\delta}_i}{dt} = w_{ном} S_i,$$

$$H_i \frac{dS_i}{dt} = -D_i S_i - f_i(\delta_i) - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^l f_{i,j}(\delta_i - \delta_j) + P_T, \quad i = \overline{1, l},$$

где $f_i(\delta_i) = P_i \sin(\delta_i^0 + \delta_i) - P_i \sin \delta_i^0$, P_i, δ_i^0 - постоянные,

$$f_{ij}(\delta_i - \delta_j) = P_{ij} \sin(\delta_{ij}^0 + \delta_i - \delta_j) - P_{ij} \sin \delta_{ij}^0, \quad \delta_{ij}^0 = \delta_i^0 - \delta_j^0, \quad P_{ij}, \delta_{ij}^0 - \text{постоянные.}$$

где $\mu_i = \mu_i(t)$ относительное перемещение заслонки, перекрывающей доступ пара, T_{n_i} — постоянная времени, представляющая собой инерцию пара в трубах пароперегревателя, c_i — коэффициент статизма i -го регулятора скорости (АРЧВ), K_i — коэффициент усиления i -канала центральной системы управления, управляющее воздействие зависит от фазового состояния всех генераторов (рис.1.).

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 [16-17].

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 по указателям на объекты базового класса вызываются методы тех классов, на объекты которых он 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.

Моделирование предметной области

Если раньше пользователи отправляли запрос на изменение приложения обработки данных и были вполне довольны, когда получали новую программу через два года, то сегодня изменение программной среды должно выполняться в течение двух недель! Становится привычной разработка в шесть недель; есть даже концепция экстремально-го программирования (XP, extreme programming), поскольку любая система должна изменяться очень быстро.

Именно поэтому увеличивается потребность в использовании UML (Unified Modeling Language — унифицированный язык моделирования) — промышленного стандарта для нотации моделирования, применяемой при разработке объектно-ориентированных систем, и основной платформы для ускоренной разработки приложений (RAD, rapid application development).

Существует четыре фазы проекта: начальная фаза (inception), уточнение (elaboration), конструирование (construction) и ввод в действие (transition). На начальной фазе происходит сбор информации и разработка базовых концепций. В конце этой фазы принимается решение продолжать (или не продолжать) проект. В фазе уточнения детализируются варианты использования и принимаются архитектурные решения. Уточнение включает в себя некоторый анализ, проектирование, кодирование и планирование тестов. В фазе конструирования разрабатывается основная часть кода. Ввод в действие — это завершающая компоновка системы и установка ее у пользователей.

UML позволяет создавать несколько типов визуальных диаграмм. Rational Rose поддерживает разработку большинства этих моделей, а именно [18]:

- а) диаграммы Классов (Class) и другие диаграммы
- б) диаграммы Деятельности (Activity);
- в) диаграммы Последовательности (Sequence).

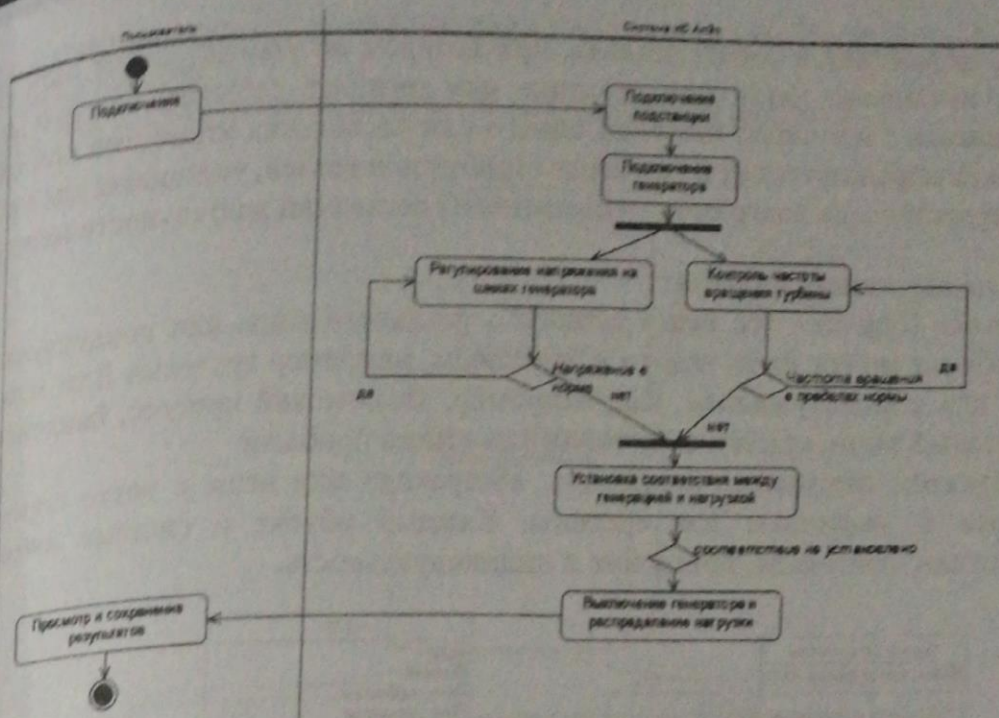


Рисунок 2 - Диаграмма распределения состояний деятельности между ролями

На рисунке 3. представлена диаграмма последовательности прецедента.

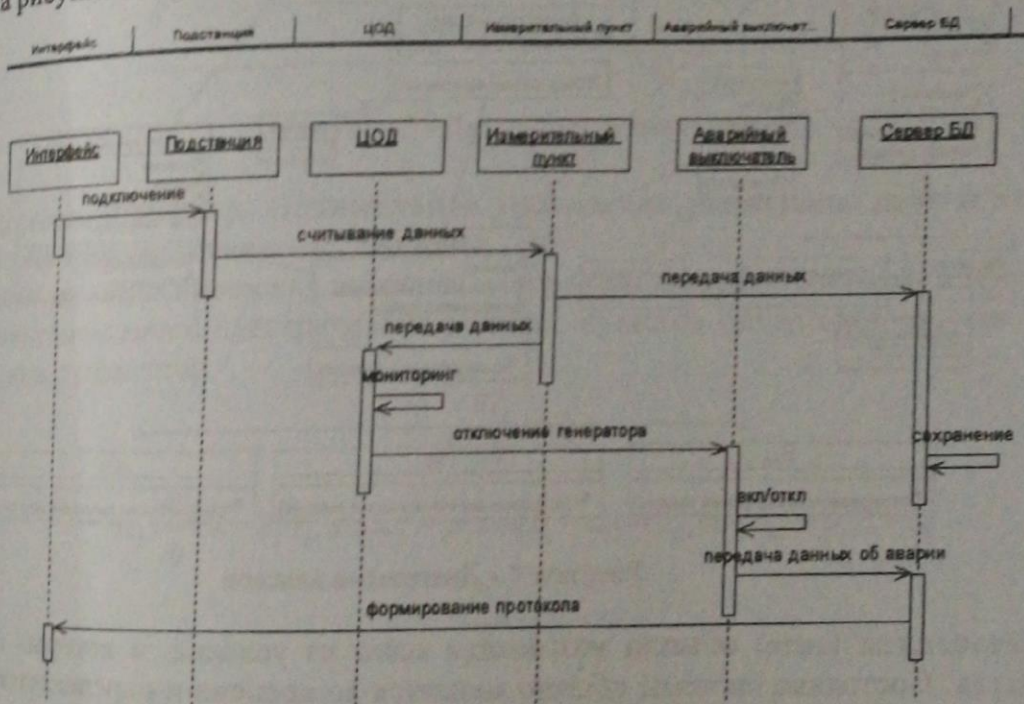


Рисунок 3

Диаграммы иллюстрируют различные аспекты системы. У каждой диаграммы есть своя цель и своя аудитория. Например, диаграмма Деятельности показывает, как должны взаимодействовать объекты, чтобы реализовать некоторую функциональность системы.

Далее рассмотрим представления функций организации в целом, то есть описания контекста системы и формирования основы для разработки диаграмм.

Следует внимательно подойти к вопросам анализа и сосредоточиться на том, что представляет собой проблема, а не на том, как она будет решаться. Состояние (state) -

это некое положение в жизни объекта, при котором он удовлетворяет определенному условию, выполняет некоторое действие или ожидает события. Состояние объекта можно описать с помощью значений одного или нескольких атрибутов класса. Состояние объекта определяется при изучении атрибутов и связей, указанных для него. На рисунке 2 представлена диаграмма распределения состояний деятельности между ролями.

Моделирование классов

Объект (object) - это некая сущность реального мира или концептуальная сущность. Объект может быть чем-то конкретным, например грузовик Джо или мой компьютер, или концептуальным, как, например, химический процесс, банковская операция, торговый заказ, кредитная история или ставка прибыли.

Объектом называется концепция, абстракция или вещь с четко определенными границами и значением для системы. Каждый объект в системе имеет три характеристики: состояние, поведение и индивидуальность.

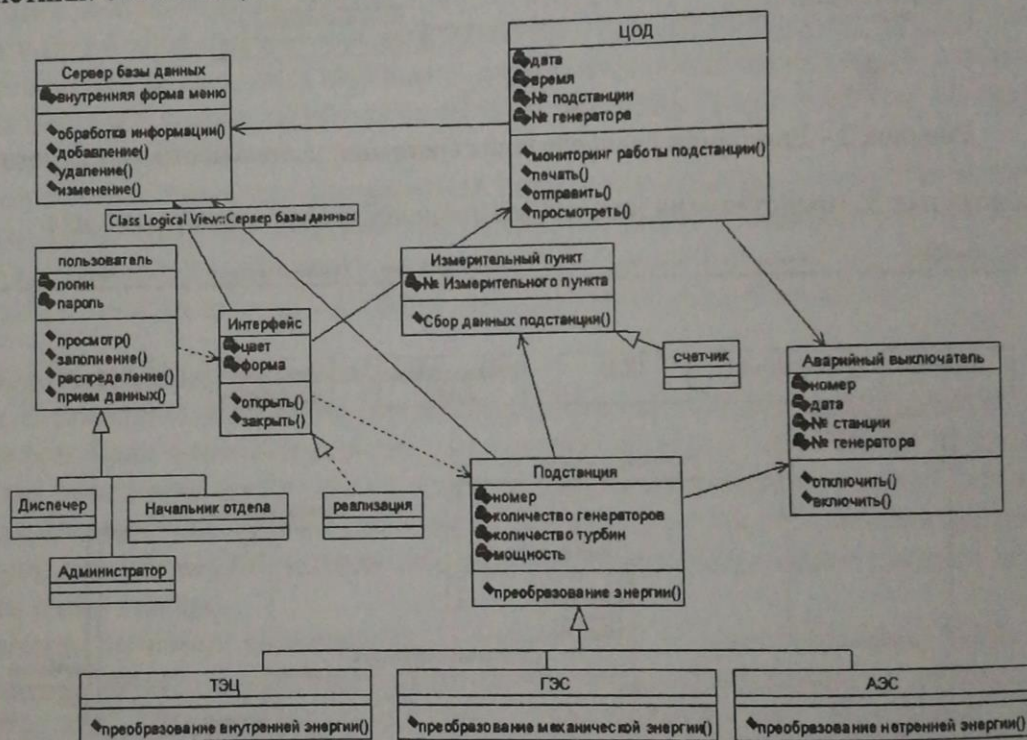


Рисунок 4 - Диаграмма классов

Состоянием (state) объекта называется одно из условий, в которых он может находиться. Состояние системы обычно меняется во времени и определяется набором свойств, называемых атрибутами (attribute), значений свойств и отношений между объектами.

Поведение (behavior) определяет, как объект реагирует на запросы других объектов и что может делать сам объект. Поведение реализуется с помощью набора операций (operation) для объекта.

Индивидуальность (identity) означает, что каждый объект уникален, даже если его состояние идентично состоянию другого объекта.

Класс (class) - это описание группы объектов с общими свойствами (атрибутами), поведением (операциями), отношениями с другими объектами и семантикой. Таким об-

рисом, классе представляет собой шаблон для создания объекта. На рисунке 4 представлена диаграмма классов.
 На рисунке 5, представлена диаграмма развертывания системы.

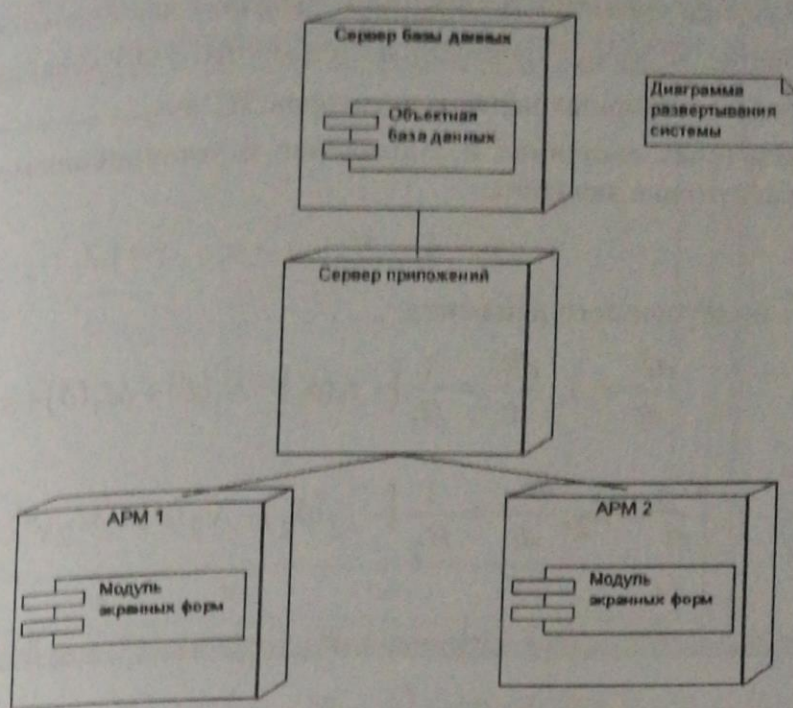


Рисунок 5 - Диаграмма развертывания

Численный пример. Оптимальное управление движением двух и многомашиной электроэнергетической системы.

Одной из математических моделей, которая описывает переходные процессы в двух и многомашиной электрической системе, является следующая система дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\dot{\epsilon}_1}{dt} = S_1,$$

$$H_1 \frac{dS_1}{dt} = -E_1^2 Y_{11} \sin a_{11} - p_1 \sin(\delta_1 - a_1) - P_{12} \sin(\delta_{12} - a_{12}) + u_1,$$

$$\frac{d\dot{\epsilon}_2}{dt} = S_2,$$

$$H_2 \frac{dS_2}{dt} = -E_2^2 Y_{22} \sin a_{22} - p_2 \sin(\delta_2 - a_2) - P_{21} \sin(\delta_{21} - a_{12}) + u_2,$$

$$\epsilon_{12} = \epsilon_1 - \epsilon_2, \quad \epsilon_{21} = \epsilon_2 - \epsilon_1,$$

$$P_1 = E_1 U Y_{1,n}, \quad P_{12} = E_1 E_2 Y_{12}.$$

δ_i - угол поворота ротора i -го генератора относительно некоторой синхронной вращения; S_i - скольжение i -го генератора; H_i - постоянная инерции i -й машины; $u_i = P_n$ механические мощности, которые подводятся к генератору; E_i - ЭДС i -й

синхронной машины; Y_{ij} – взаимная проводимость i -й и j -й ветвей системы; $U = \text{const}$ – напряжение на шинах постоянного напряжения; $Y_{i,n+1}$ – характеризует связь (проводимость) i -го генератора с шинами постоянного напряжения; $D_i = \text{const} \geq 0$ – механическое демпфирование; a_{ii}, a_i, a_{ij} – постоянные величины, учитывающие влияние активных сопротивлений в статорных цепях генераторов. $a_{ji} = a_{ij}$.

Пусть переменные состояния и управление в установившемся послеаварийном режиме имеют следующие значения:

$$S_i = 0, \quad \delta_i = \delta_i^f, \quad u_i = u_i^f, \quad i = 1, 2.$$

Уравнение возмущенного движения:

$$\frac{d\dot{\epsilon}_1}{dt} = S_1, \quad \frac{dS_1}{dt} = \frac{1}{H_1} [-f_1(\delta_1) - N_1(\delta) + M_1(\delta) + u_1]$$

$$\frac{d\dot{\epsilon}_2}{dt} = S_2, \quad \frac{dS_2}{dt} = \frac{1}{H_2} [-f_2(\delta_2) - N_2(\delta) + M_2(\delta) + u_2]$$

где

$$f_1(\delta_1) = P_1 [\sin(\delta_1 + \delta_1^F - \alpha_1) - \sin(\delta_1^F - \alpha_1)]$$

$$f_2(\delta_2) = P_2 [\sin(\delta_2 + \delta_2^F - \alpha_2) - \sin(\delta_2^F - \alpha_2)]$$

$$N_1(\delta) = \Gamma_1 [\sin(\delta_{12} + \delta_{12}^F)],$$

$$M_1(\delta) = \Gamma_2 [\cos(\delta_{12} + \delta_{12}^F)]$$

$$\delta_{12}^F = \delta_1^F + \delta_2^F, \quad \Gamma_1 = P_{12} \cos \alpha_{12}, \quad \Gamma_2 = P_{12} \sin \alpha_{12}.$$

Числовые данные системы

$$a_1 = -0.052; \quad a_2 = -0.104; \quad H_1 = 2135; \quad H_2 = 1256; \quad P_1 = 0.85;$$

$$P_2 = 0.69; \quad P_{12} = 0.9; \quad \delta_1^F = 0.827; \quad \delta_2^F = 0.828, \quad \alpha_{12} = -0.078$$

и начальные условия:

$$\dot{\epsilon}_1(0) = 0.18; \quad \dot{\epsilon}_2(0) = 0.1; \quad S_1(0) = 0.001; \quad S_2(0) = 0.002.$$

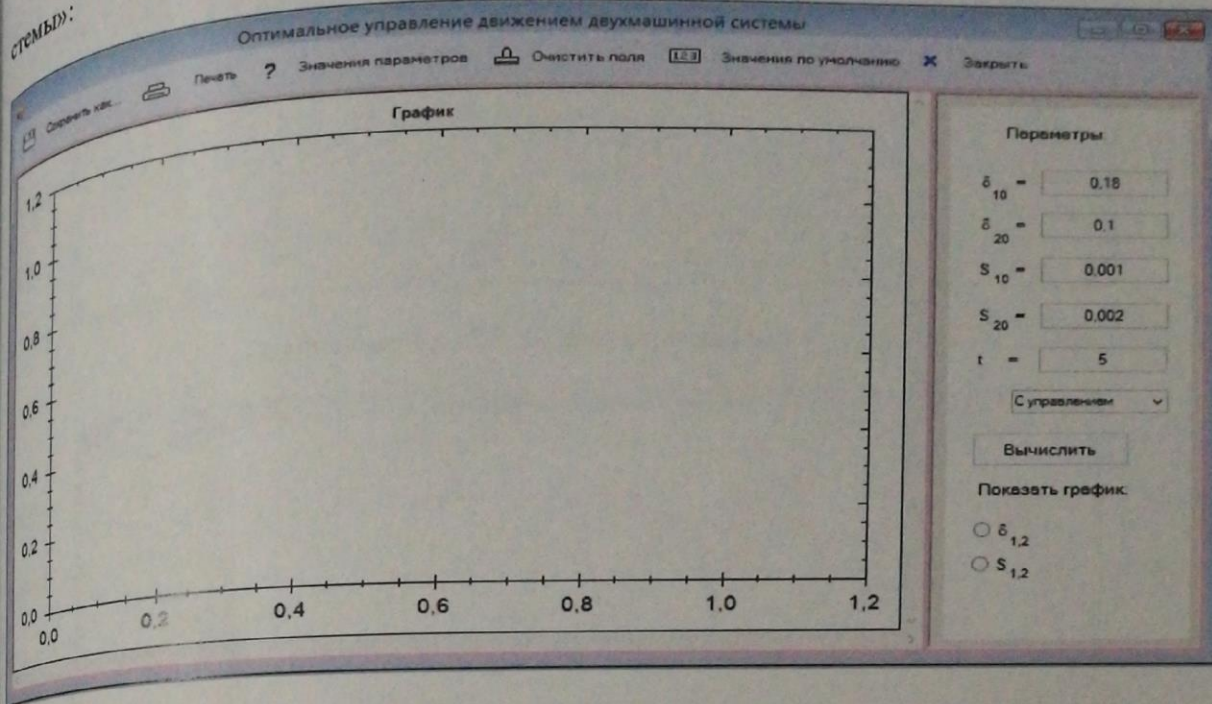
Согласно теореме 3.3.1 оптимальное управление имеет вид:

$$u_1 = -\frac{1}{w_1} S_1 - M_1(\delta),$$

$$u_2 = -\frac{1}{w_2} S_2 - M_1(\delta),$$

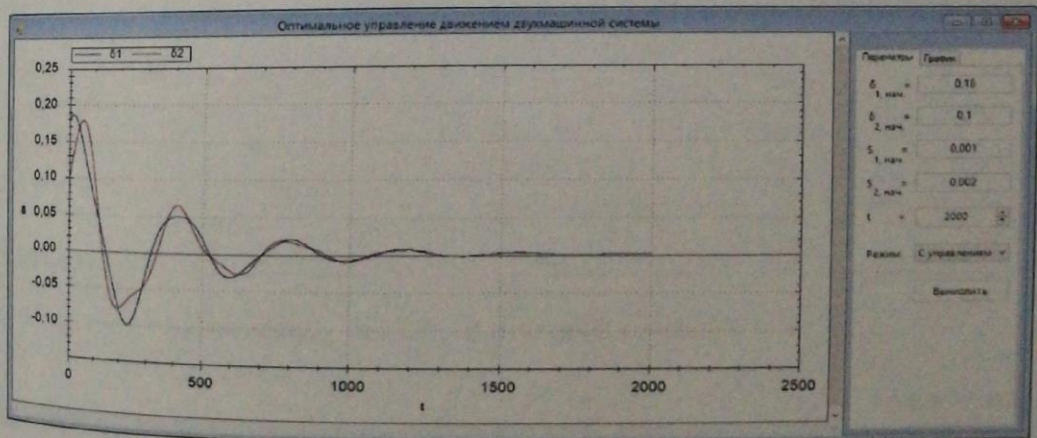
где $w_1 = 0.1, w_2 = 0.1$.

Скриншот программы «Оптимальное управление движением двухмашинной системы»:

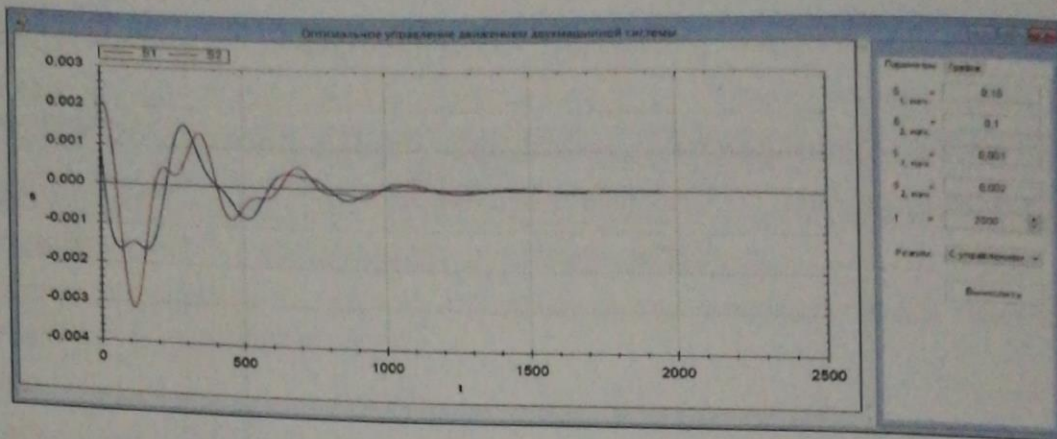


В программе для численного интегрирования дифференциального уравнения используется метод Эйлера. В программе можно выбрать одну из двух режимов: с управлением и без управления. После выбора режима по нажатию кнопки «Вычислить» программа проводит вычисление и отображает результаты в виде графика. Отображаемый график можно выбрать с помощью кнопок расположенные внизу правой стороне окна программы.

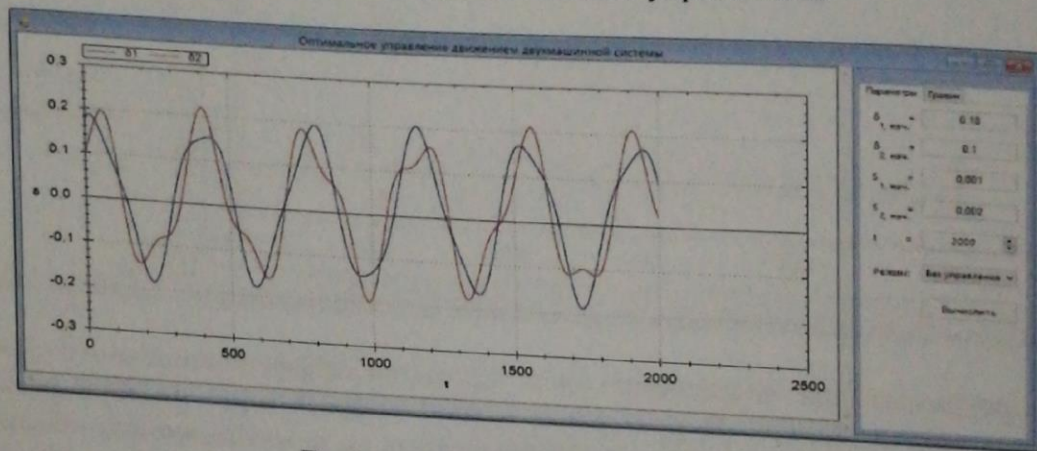
Ниже приведены скриншоты программы:



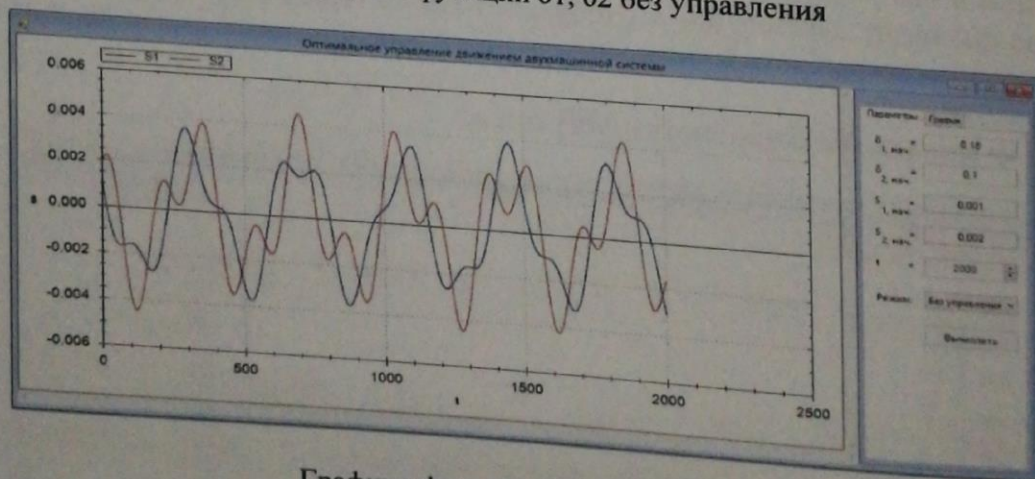
Графики функции δ_1, δ_2 с управлением



Графики функции S_1, S_2 с управлением



Графики функции δ_1, δ_2 без управления



Графики функции S_1, S_2 без управления

Заключение

В данной статье были рассмотрены объекты информационной системы электроэнергетических систем. Приводится подробная схема информационной системы. Рассматриваются математические модели электроэнергетических систем. На примере математической модели приводится численный пример, который показывает высокую эффективность предложенного метода.

Литература

1. Чинков М.К., Маслов С.П. Вычислительная техника и вопросы кибернетики. СПб.: ЛГУ, 1190. 185с. ISBN: 5-288-00612-1.
2. Петров В.Н. Информационные системы. СПб.: Питер:2003. 688 с. ISBN:5-318-00561-6.
3. Марк Д.А., МакГоуэн К. Методология структурного анализа и проектирования SADT. М.:Метатехнология, 1993. 240 с.
4. Шилдт Г. С#: учебный курс. СПб.:Питер: К.: Издательская группа ВНУ. 2003. 512 с.
5. Пецольд Ч. Программирование для Microsoft Windows на С#. М.: Издательский торговый дом «Русская редакция». 2002. Т.1. 576 с.
6. Рихтер Д. CLR via С#. Программирование на платформе Microsoft.NET Framework 2.0 на языке С#. Мастер класс. / Перевод с англ.яз. СПб.:Питер. 2007. 656 с.
7. Хансен Г. Базы данных: разработка и управление. М.: Бином. 1999
8. Коннолли Т. Базы данных. Проектирование, реализация и сопровождение. Теория и практика. М.:Вильямс. 2000.
9. Мамиконов А.Г.,Кульба В.В. Синтез оптимальных модульных систем обработки данных. М.:Наука 1986. 275 с.
10. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. — М.: ИАЦ Энергия, 2010. — 208 с.
11. Rumbaugh, D., M. Blaha UML 2.0 object-oriented modeling and development. 2nd edition. St. Petersburg: Peter. 2007. 544 p
12. Dyachenko RA, YA Kabankov, Yuferova OS, VV Terekhov Development of an automaton model of contactor // Scientific Readings named after Professor NE Zhukovsky. Materials of I All-Russian scientific-practical conference on Mechanics / Krasnodar Higher Military School of Pilots. Krasnodar KVVAUL, 2011. P. 32-37
13. Попов Д.Б. Разработка и реализация информационно-вычислительной системы для исследования динамической устойчивости электроэнергетических систем. // Вычислительные технологии. Т.13. 2008. -С. 59-68.
14. Вайман М.Я. Исследование систем, устойчивых в «большом» - М.: Наука, 1981. - 255 с.
15. Бернас С., Цек З. Математические модели элементов электроэнергетических систем. - М.:Энергоиздат, 1982. - 312с.
16. Коротков В.А. Оптимальная стабилизация энергосистем на основе метода функции Ляпунова // Труды СибНИИЭ. - 1975. - вып.26. - С.65-72.
17. 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.
18. Маклаков С.В. BPWin и ERWin. CASE-средства разработки информационных систем. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2000.