

## Алгоритм разработки объектов иерархии моделей заданной предметной области в моделирующем сервисном центре

Чепцов А.А.  
Кафедра ЭВМ ДонНТУ  
lex@cs.dgtu.donetsk.ua

### **Abstract**

*Cheptsov A.A. Algorithm of the domain area's models hierarchy's objects developing in the simulation and servicing centre. As a technology of the model-driven technological objects support the simulation and informational-servicing centre is supposed, the first prototype of that is developed for the coal industry. In a paper the algorithm of the models developing are supposed and described for the domain area "Coalmining ventilation networks and underground works safety".*

### **1. Введение**

Моделирование, как метод исследования сложных динамических систем различных предметных областей, в последнее время приобретает новое функциональное качество – математические модели и алгоритмы решения во всё возрастающей мере используются не только с целью анализа и прогнозирования состояния объектов исследования, но также и для контроля и управления технологическими процессами и производствами в целом, путем их реализации в форме симуляторов с использованием современных информационных технологий. Возможность функциональной организации средств моделирования в качестве моделирующих сред поставила перед специалистами в области моделирования новые задачи проектирования, реализации и системной организации средств моделирования нового поколения, на основе которых можно с небольшими функциональными затратами разрабатывать проблемно-ориентированные симуляторы, в максимальной степени учитывающие специфику динамических систем и процессов различных предметных областей, а также моделирующие центры, обеспечивающие и координирующие их функционирование.

В качестве технологии преодоления сложности моделей технологических систем различных предметных областей на всех этапах их построения и использования предлагается моделирующий сервисный центр (МСЦ) [1]. Проведенный в [2] анализ показывает, что фактором, объединяющим разные предметные области как сферы применения методов и средств моделирования, является наличие в них сложных динамических систем, характеризующихся формальными методами

математического и топологического описания, что обуславливает построение МСЦ с универсальных позиций, однако алгоритмически ориентированно на специфику каждой из них. При этом актуальной задачей является создание универсальных методик разработки и компьютерной реализации объектов иерархии моделей для предметных областей в рамках системно-технической архитектуры МСЦ.

## 2. Системная организация аппаратных ресурсов и программных компонентов МСЦ

Исходя из требований к распределенным моделирующим средам [2], в качестве базовой системной архитектуры для МСЦ предлагается использовать архитектуру компонентно-базированных сервисо-ориентированных распределённых систем [3]. Среди технологий, реализующих данную архитектуру, нами была выбрана адаптированная к специфике моделирующей техники XML-базированная технология DESF (Discrete Event Simulation Framework) [4], в соответствии с которой МСЦ представляется как *SimGrid* – сервисо-ориентированная GRID-инфраструктура [5] с использованием SWT (Standard Web Technologies) [6]. Данная технология предусматривает использование моделей МСЦ путём предоставления соответствующих моделирующих сервисов, размещённых на стороне серверных и сверхпроизводительных ресурсов МСЦ и доступных территориально удалённым пользователям МСЦ по сети Интернет по протоколам SOAP/HTTP (рис.1).

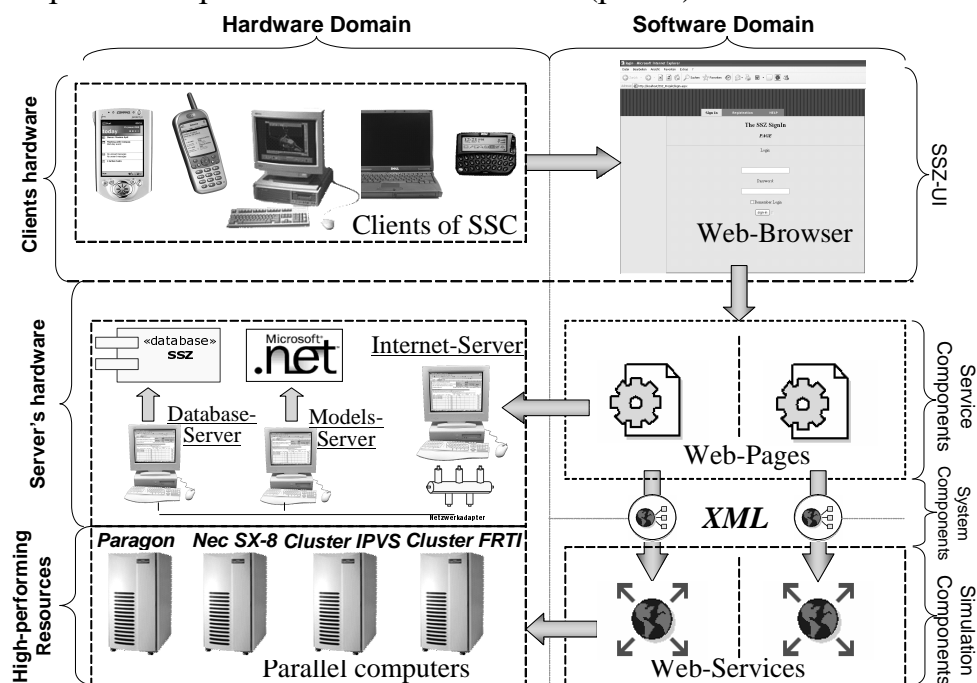


Рисунок 1 – Структурная организация программных и аппаратных ресурсов МСЦ в рамках SimGrid-среды.

С её использованием для пользователей МСЦ достигается возможность использования сложных моделей при ограниченных клиентских аппаратных ресурсах, а также доступа к сверхпроизводительным ресурсам при решении трудоёмких задач моделирования.

Под **SimGrid**-системой будем понимать вычислительные, сетевые и программно-технические распределённые компьютерные ресурсы, совместно функционирующие с целью решения задачи виртуальной организации и использования моделирующих компонентов МСЦ. Архитектура моделирующих служб (SimGrid-Services) в рамках SimGrid-системы специфицируется в соответствии с OGSA (Open Grid Source Architecture) [7], посредством которой они становятся доступными множеству Grid-клиентов (специалистов предметной области МСЦ). Реализация моделирующих служб осуществляется на основе одной из компонентно-базированных технологий распределённого программирования (ASP.NET-SimGrid, Java-SimGrid и др.).

В структуре аппаратных ресурсов МСЦ базовым узлом является МСЦ-сервер, который сосредотачивает в себе главную часть вычислительных ресурсов. Первоначально предполагается, что МСЦ-сервер функционирует на базе вычислительных ресурсов ДонНТУ. Он обеспечивает авторизацию, пользовательскую и техническую поддержку клиентов, предоставляет им доступ к проблемно-ориентированной моделирующей среде на пользовательском уровне, а также обеспечивает своевременное и качественное выполнение задач моделирования средствами иерархии моделей и симуляторов МСЦ, хранение, обработку и анализ полученных результатов процесса моделирования. Клиенты МСЦ получают доступ к ресурсам МСЦ-сервера через объединения своих ЛВС, с использованием Internet-соединения.

С целью повышения продуктивности процесса моделирования критичных по условиям безопасности технологических процессов и объектов предметных областей, в структуре МСЦ предлагается задействовать высокопроизводительные вычислительные ресурсы ДоНТУ (MIMD-кластеры современных компьютеров, MIMD-вычислительный комплекс Paragon), а также академических партнёров данного проекта (сверхпроизводительный компьютерный вычислительный центр NEC-SX8 [Штуттгартский университет], 512-процессорный кластер с высокоскоростной коммутационной системой CLiC [Хемницкий технический университет], а также набор кластеров, функционирующих в Магдебургском, Штуттгартском и Эрлангенском университетах).

### 3. Разработка моделирующих компонентов МСЦ

В соответствии с требованиями к МСЦ [1], для каждого I(K)-объекта иерархии моделей предметной области (где I – функциональный уровень иерархии моделей заданной предметной области, J – технологическое направление, K – объект/процесс) предлагается реализовывать универсальный процесс разработки следующего вида: модель (*model*) → приведенная модель (*simulation model*) → дискретная модель (*discrete simulation model*) → симулятор (*simulator*).

Под моделью (*model*) будем понимать математическое описание, с максимальной достоверностью представляющее протекающие в объекте исследования сложные динамические процессы. В качестве примера модели может быть приведено описание неустановившегося воздухораспределения в штреке шахтной вентиляционной сети с учётом утечек в выработанное пространство [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\partial P}{\partial \xi} = -\frac{2\rho}{F^2} Q \frac{\partial Q}{\partial \xi} + \frac{\rho}{F} \frac{\partial Q}{\partial t} + rQ^2 + r'(t)Q^2 \\ -\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\rho a^2}{F} \frac{\partial Q}{\partial \xi} - \frac{\rho a^2}{F} q \end{array} \right. , \quad (1)$$

где  $P$ ,  $Q$  – соответственно давление и расход воздуха в штреке;  $\rho$ ,  $F$ ,  $q$ ,  $r$ ,  $r'$ ,  $a$  – аэродинамические коэффициенты и параметры модели штрека.

Математическое описание разрабатывается отдельно для динамических систем с сосредоточенными (ДССП-модели) и распределёнными (ДСРП-модели) параметрами. Для описания ДССП выводятся уравнения для каждого из её составных элементов с учётом начальных и граничных условий, эффект композиции которых в систему уравнений, описывающую сложную ДССП, достигается путём агрегации в неё по определённой методике характеристик и функций топологических взаимосвязей между выделенными элементами. В общем случае ДССП-модель содержит:

- нелинейные и линейные дифференциальные уравнения различных порядков;
- алгебраические уравнения.

Для формализации и автоматического генерирования уравнений в математическое описание ДССП вводятся: векторы неизвестных переменных, их производных и нелинейных функций от них; матрицы топологических взаимосвязей элементов сетевого динамического объекта; матрицы параметров и векторы известных функций (характеристики активных элементов ДС – генераторов, насосов, турбокомпрессоров, двигателей, вентиляторов и т.п.; детерминированные и случайные функции влияния внешней среды); векторы вспомогательных переменных для определения переменных с порядками  $n > 1$ . Формальными матрично-векторными операциями можно привести математическое описание СДС к

системе уравнений в виде *simulation model*, пригодной для дальнейшего численного решения, которая может быть представлена как система вида (2):

$$\left. \begin{aligned} \dot{Y} &= AY + BX + CF(t) + DZ \\ X &= \varphi(Y) \\ Z &= \phi(Y, t) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $Y$  – вектор неизвестных переменных;  $X$  – вектор нелинейных функций;  $F(t)$  – вектор функции влияния внешней среды,  $Z = \phi(Y, t)$  – вектор характеристик активных элементов;  $A, B, C, D$  – матрицы параметров и связей.

Математическое описание ДСРП представляется дифференциальными уравнениями в частных производных. Особенность ДСРП-моделей заключается в том, что система уравнений для них является смешанной: часть элементов топологии ДС могут являться объектами с распределёнными параметрами, которые совместно функционируют с динамическими и безинерционными объектами с сосредоточенными параметрами. С позиции построения моделей ДСРП подразделяются на системы параболического, гиперболического, эллиптического и специального типов. Для численного решения дифференциальных уравнений в частных производных может быть использован один из методов нахождения дифференциально-разностной схемы (метод прямых, метод характеристик и др.), которая представляет собой совокупность обыкновенных дифференциальных уравнений, с достаточной степенью точности аппроксимирующих базовые дифференциальные уравнения в частных производных ДСРП и приведенных к виду (2). Так, на основе метода прямых [9], для ДСРП-модели штрека (1) может быть приведена следующая *simulation model*:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dQ_{ouk}}{dt} &= \frac{F_{ou}}{\rho} \cdot \frac{P_{ou, k+1} - P_{ou, k}}{\Delta \xi} + \frac{2}{F_{ou}} \cdot Q_{ou, k} \cdot \frac{Q_{ou, k+1} - Q_{ou, k}}{\Delta \xi} - \frac{F_{ou}}{\rho} \cdot r_{ou} \cdot Q_{ou, k}^2 - \frac{F_{ou}}{\rho} \cdot r_t(t) \cdot Q_{ou, k}^2 \\ \frac{dP_{ou, k+1}}{dt} &= \frac{\rho a^2}{F_{ou}} \cdot \frac{Q_{ou, k+1} - Q_{ou, k}}{\Delta \xi} - \frac{\rho a^2}{F_{ou}} q_k, \quad k=1..m \end{aligned} \right. \quad (3)$$

В динамических объектах сетевой топологии уравнения элементов объединяются топологическими матрицами инцидентий и контуров в систему уравнений, состоящую из  $n-1$  уравнений для узлов

$$AQ = 0, \quad (4)$$

и  $\gamma = m - n + 1$  уравнений для контуров

$$SK \frac{dQ}{dt} + SRZ = SH, \quad (5)$$

где  $m, n$  – соответственно количество ветвей и узлов сетевого объекта (ШВС);  $A, S$  – соответственно топологические матрицы инцидентий и контуров;  $Q, H$  – соответственно векторы расходов воздуха в ветвях и разностей давлений вентиляторов,  $K, R, Z$  – диагональные матрицы аэродинамических параметров.

С использованием алгоритма решения *simulation model* (2) представляется в виде совокупности *discrete simulation model*, упорядоченных в соответствии с применяемыми при реализации моделей численными методами. С целью достижения необходимой или максимальной точности решения системы (2) используется один из методов численного решения систем обыкновенных дифференциальных уравнений (метод Эйлера, метод Рунге-Кутты 4-го порядка, метод Адамса-Башфорта 2-го порядка, блочный 2-точечный одношаговый разностный метод и др.).

Например, для *simulation model* (3) может быть предложена следующая Адамса-Башфорта 2-го порядка *discrete simulation model* вида (6):

$$\begin{cases} V_Q^k(i) = \frac{F}{\rho} \cdot \frac{P_{k+1}^{(i)} - P_k^{(i)}}{\Delta \xi} + \frac{2}{F} \cdot Q_k^{(i)} \cdot \frac{Q_k^{(i)} - Q_{k+1}^{(i)}}{\Delta \xi} - \frac{F}{\rho} r(Q_k^{(i)})^2 - \frac{F}{\rho} r'(t) \cdot (Q_k^{(i)})^2 \\ V_P^k(i) = \frac{\rho a^2}{F} \cdot \frac{Q_{k+1}^{(i)} - Q_k^{(i)}}{\Delta \xi} + \frac{\rho a^2}{F} q_k, \quad k = 1..M \\ Q_k^{(1)} = Q_k^{(0)} + h \cdot (V_Q^k(0)), \quad P_{k+1}^{(1)} = P_{k+1}^{(0)} + h \cdot (V_P^k(0)), \quad i = 0 \\ Q_k^{(i+1)} = Q_k^{(i)} + \frac{h}{2} (3V_Q^k(i) - V_Q^k(i-1)), \quad P_{k+1}^{(i+1)} = P_{k+1}^{(i)} + \frac{h}{2} (3V_P^k(i) - V_P^k(i-1)), \quad i > 0 \end{cases} \quad (6)$$

где  $h$  – шаг численного дифференцирования,  $\mathbf{Q} = \{Q_1, \dots, Q_k, \dots, Q_M\}$ ,  $\mathbf{P} = \{P_1, \dots, P_k, \dots, P_{M+1}\}$  – векторы аэродинамических параметров вдоль продольных координат штрека,  $M$  – количество пространственно-аппроксимирующих элементов длиной  $\Delta \xi$ .

Разработанные дискретные модели подлежат программной реализации в виде исполняемых программных компонентов (симуляторов), которые в дальнейшем могут быть интегрированы в МСЦ в соответствии с принципами системной организации его аппаратных ресурсов и программных моделирующих и служебных компонентов, что осуществляется на основе выбранной программно-технической платформы и посредством технологий разработки программного обеспечения. В качестве примера объектно-ориентированной реализации функциональности модели в рамках системотехнического решения МСЦ может быть приведена автономная web-служба (рис. 2).

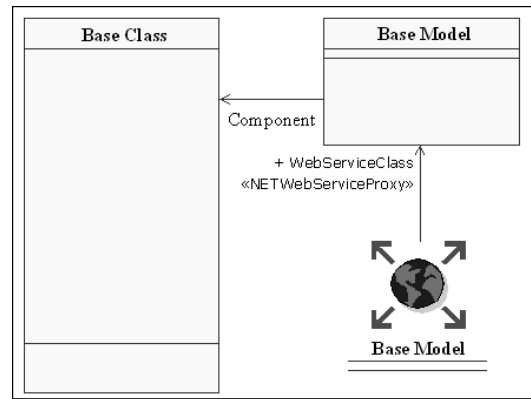


Рисунок 2 – Объектно-ориентированное представление *web*-базированной модели.

#### 4. Заключение

Представленные в данной работе теоретические, модельные и программные разработки, а также проведенные экспериментальные исследования подтверждают достижение основных поставленных целей – концептуальной разработки и реализации методики системной и алгоритмической организации средств и методов модельной поддержки и сопровождения сложных динамических систем различных предметных областей в форме проблемно-ориентированного моделирующего и сервисного центра, предоставляющего возможность эффективного целенаправленного применения метода компьютерного моделирования для решения проблем исследования на единых методических принципах.

Первый прототип МСЦ был разработан для угольной промышленности, в рамках которого в соответствии с предложенным и рассмотренным в данной работе алгоритмом были разработаны и программно реализованы модели технологического направления «Техника безопасности и проветривание» [10]: модель лавы, модель откаточного штрека, модель вентиляционного штрека, модель воздухоподающего ствола, модель воздухоотводящего ствола, модель схемы проветривания выемочного участка, модель шахтной вентиляционной сети как объекта с сосредоточенными параметрами, модель шахтной вентиляционной сети как объекта с распределёнными параметрами. Дальнейшие разработки концентрируются на реализации моделей для предметной области «Шахтные вентиляционные системы и безопасность труда горняков», а также внедрении моделирующего сервисного центра в технологический процесс угольной промышленности и апробации, что планируется осуществлять на базе шахты „Южно-Донбасская №3” (Донецкая область, Украина).

## **Литература**

1. Cheptsov O., Svjatnyj V., Hohmann R. Die Entwicklung eines Simulations- und servicezentrums für gegebenes Gegenstandsgebiet. / Наукові праці ДонДТУ, Серія: "Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка", вип. 93, 2005, с. 151-158.
2. Святный В.А.: Паралельне моделювання складних динамічних систем / Сборник трудов конференции «Моделирование-2006», Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е.Пухова НАН Украины, Киев 2006. – с.83-90.
3. Leymann, F. Web Services: Distributed applications without limits. Proceedings BTW 03, Berlin Heidelberg New York Tokio: Springer, 2003
4. Thomas Wiedemann. Next Generation Simulation Environments Founded on Open Source Software and XML-Based Standard Interfaces. In Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, 2002.
5. Gyimesi, M., Breiteneker, F. Simulation Service Providing als Web Service. In: F.Hülsemann u.a. (Hrsg.), Tagungsband 18. ASIM-Symposium Simulationstechnik, Erlangen 2005, SCS 2005.
6. Senthilanand Chandrasekaran, Gregory Silver, John A. Miller, Jorge Cardoso and Amit P.Sheth: Web Service Technologies and their Synergy with Simulation. In Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, 2002.
7. Berman, F., Hey, A., Fox, G.: Grid computing: Making the global infrastructure a reality. – Wiley, 2003.
8. Абрамов Ф.А., Фельдман Л.П., Святный В.А. Моделирование динамических процессов рудничной аэрологии. – К.: Наукова думка, 1981. – 284с.
9. Бахвалов Н., Жидков Н., Кобельков Г. Численные методы. – М.: Изд-во «Лаборатория базовых знаний», 2003. – 632 с.
10. Zur Entwicklungsorganisation des Simulations- und Servicezentrums für die Kohleindustrie / O. Cheptsov, V. Svjatnyj, O. Beljaev, V. Lapko, O. Schkrebez/ Simulationstechnik 18. Symposium in Erlangen, September 2005. – s.554-559.