

Использование структурного и параметрического полиморфизма при создании цифровых двойников

Рассматривается создание цифровых двойников на основе механизмов структурного и параметрического полиморфизма совместно с ансамблями таблиц решений. Представлена новая точка зрения на понятие полиморфизма применительно к построению цифровых моделей физических объектов. Предлагается новый подход к использованию таблиц как механизма создания цифрового двойника за счет обработки потоков данных и формирования управляющих сигналов на объекты технической системы, определяющихся с помощью значений показателей метрической системы.

Ключевые слова: структурный полиморфизм, параметрический полиморфизм, таблицы решений, цифровая модель, цифровая тень, цифровой двойник

ВВЕДЕНИЕ

Цифровые двойники – новое направление в области информационных технологий для решения таких задач как: повышение производительности и эффективности при планировании и контроле производства, оптимизация производственных систем, информационная поддержка принятия решений.

Различают цифровую модель, цифровую тень и цифровой двойник [1–4].

Цифровая модель представляет собой описание структуры и параметров существующих или планируемых объектов технической системы, она не использует какие-либо средства автоматического обмена данными с физическим объектом, которые, как правило, имеют свою систему классификации и ориентированы на описание и управление определенными группами объектов.

После наполнения конкретными данными цифровая модель становится цифровой тенью или цифровым двойником – в зависимости от направления потоков данных. Цифровой двойник отличается тем, что изменение параметров в нем приводит к изменению объекта технической системы. Эта особенность поведения достигается наличием двунаправленной связи, с помощью которой физический объект обменивается данными со своим цифровым двойником в автоматическом режиме. От физического объекта поступают данные об изменениях внешней среды, а от цифрового двойника – данные об изменении внутреннего состояния объекта [5–7].

В процессе реализации конкретного технического решения или изделия появляется дополнительная информация, которая показывает, насколько произведенный продукт отличается от своей идеальной цифровой модели, например, погрешностью размеров, дефектами микроструктуры материала, возникающими в процессе эксплуатации и т.п. Эта информация необходима для мониторинга и управления им на этапах жизненного цикла.

В настоящей работе предлагается использование структурного и параметрического полиморфизма при построении шаблона цифровой модели и перехода к цифровому двойнику конкретного экземпляра физического объекта, который ориентирован на управление подобными объектами.

Поскольку цифровая модель включает описания структуры, физической модели, различных процессов, происходящих в объекте реального мира, то при переходе к цифровому двойнику возникает потребность корректировки структур данных для более точного их описания.

Структурный полиморфизм проявляется во внешней общности методов работы с экземплярами информационных объектов (при этом метод не зависит от внутренней структуры данных) и реализуется как через наследование прототипов, так и через перегрузку методов.

Структурный полиморфизм дает возможность представить методы работы со структурами данных в виде одинаковых спецификаций и методов, которые выбираются в зависимости от меры входных пара-

метров, и реализуется через набор событий информационной системы, осуществляющих преобразование данных и запись их в информационный объект в соответствии с методами обработки событий с учетом фрагмента структуры иерархии прототипов.

В многослойной структуре классов только нижний её уровень связан с объектами реального мира. Все вышележащие уровни являются абстрактными и необходимы для увеличения повторяемости использования кода [8].

СТРУКТУРНЫЙ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПОЛИМОРФИЗМ КАК СПОСОБ СОЗДАНИЯ ВЕРСИЙ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Хотя полиморфизм является распространенным понятием, нет единого мнения относительно его точного определения [9]. Применительно к процессу создания цифровых моделей под полиморфизмом будем понимать возможность вызывать действие или группу действий для цифровых моделей, принадлежащих одному классу, не зная в точности для какой структуры информационного объекта, и какая именно реализация метода будет осуществлена. Конкретная структура информационного объекта и метод работы с ней определяются в момент возникновения потока данных от объекта реального мира к его цифровой тени. Таким образом, полиморфизм – это механизм, позволяющий установить связь между шаблоном цифровой модели и экземпляром, описывающим конкретный объект технической системы, и использовать общие для данного шаблона методы работы с данными [10-14].

При создании цифровых моделей объектов сложной технической системы применяемое программное обеспечение решает различные классы задач: визуальное моделирование, создание твердотельных объектов, триангуляция и создание на её основе моделей физических процессов, программирование алгоритмов поведения объектов, создание объектных хранилищ и баз данных, организация обмена данными при взаимодействии физических объектов и их цифровых двойников. Цифровая модель объекта реального мира может создаваться как оригинальное техническое решение, существующее в единственном экземпляре, и её использование может осуществляться только для конкретного технического решения. Однако по мере развития цифровых технологий возникает необходимость в создании шаблонов цифровых моделей для объектов, имеющих подобные классификационные признаки. К таковым могут относиться лопатки турбин, валы, оси, подшипники и т.п. из которых в последствии осуществляется сборка цифровой модели сложной технической системы.

Процедуры и методы сбора, обработки, преобразования, записи и хранения данных определяются процессами, происходящими в сложной технической системе. При создании шаблонов цифровых моделей используются конструкции прототипов для описания структур данных и методов работы с процессами. Набор прототипов, описывающих модель предметной области, образует структуру информационного

объекта. На каждом уровне иерархии, каждому прототипу соответствует набор объектов технической системы. При этом, в зависимости от значений свойств объекта и наличия определенных процессов будет однозначно определяться их информационное наполнение.

События в реальном мире порождают соответствующие процессы в информационной системе. При наличии связи между реальным объектом и информационной системой через набор событий осуществляется изменение информационного наполнения объектов информационной системы [15].

Структурный полиморфизм позволяет осуществлять динамическое преобразование набора структур иерархий прототипов информационных объектов, интегрированных в процессы создания цифровой тени объекта или в группы объектов технической системы.

Структурный полиморфизм реализован в метрической системе управления процессами, представляющей собой набор показателей, организованных в соответствии со структурой процессов и используемых в них информационных объектов для обеспечения контроля достижения цели управления во взаимосвязанных подсистемах [8]. Каждый показатель характеризуется мерой и единицами измерений.

Любое оригинальное техническое решение содержит типовые элементы. Иерархия классов при структурном полиморфизме должна обеспечить создание цифровой модели конструкции, созданной из типовых элементов. Структурный полиморфизм должен обеспечить создание новых оригинальных решений, которые впоследствии войдут в иерархию классов типовых решений. Структурный полиморфизм используется для создания шаблона цифровой модели и будет удобен при поиске аналогов типовых элементов в иерархии классов.

Создание сложного технического объекта связано с использованием фрагментов типовых и оригинальных решений, так как типовые решения могут не обеспечивать ограничений, накладываемых на техническую систему, например, ограничений по массе, по обеспечению требуемой мощности и т.п.

Параметрический полиморфизм – это механизм, позволяющий обрабатывать значения различных типов объектов одинаковым образом. Он может быть использован для того, чтобы методы работы с данными шаблона цифровой модели могли быть применены для формирования цифровой тени объектов одного класса, входящих в сложную техническую систему [16–18]. Например, можно определить общий тип для создания списков деталей, узлов, агрегатов, списков их состояний, процедур и видов взаимодействия, списков записей базы данных или объектов других типов.

Совместное использование структурного и параметрического полиморфизма позволит решать более широкий круг задач по проектированию цифровой модели, наполнению её данными и управлению технической системой на основе её цифрового двойника, что показано в таблице.

Цели и задачи структурного и параметрического полиморфизма для информационной поддержки процесса создания цифровой модели и цифрового двойника

Вид полиморфизма	Цель применения	Решаемые задачи
Структурный полиморфизм	Упрощение процесса построения цифровой модели физического объекта из шаблона	Возможность наследования структур данных и свойств от родительских объектов в пределах своего класса. Более точное отражение объекта реального мира при формировании его цифровой тени за счет возможности изменения структуры информационного объекта. Возможность анализа данных и поиска
Параметрический полиморфизм	Унификация методов работы с данными при переходе от цифровой модели к цифровой тени объекта технической системы	Возможность наследования методов работы с данными от родительских объектов в пределах своего класса. Создание универсальных методов работы с данными для организации взаимодействия между физическим объектом и его цифровым двойником

ПРИМЕНЕНИЕ «ТАБЛИЦ РЕШЕНИЙ» ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

Одним из методов реализации обратной связи между объектом технической системы и его цифровым двойником являются таблицы решений (ТР), которые позволяют строить интеллектуальные информационные системы для анализа и управления физическими объектами посредством цифровых двойников. Эти таблицы, в сравнении с экспертными системами, имеют преимущества: простота построения и использования, возможность встраивания в архитектуры объектных баз данных. Одним из вариантов представления этих таблиц являются деревья решений.

В отличие от условных операторов языков программирования результаты вычисления в таблицах решений не зависят от порядка расположения объектов в таблице, что при определенных условиях может быть и достоинством, и недостатком, ограничивающим возможности представления вариантов решения задач.

Таблицы решений, как правило, разделяются на четыре квадранта:

- 1) условия – список возможных условий, которые представляются в виде значений показателей метрической системы;
- 2) варианты выполнения условий – комбинация из выполнения и/или невыполнения условий из списка;
- 3) действия – список применяемых методов работы с данными для цифровой тени и управляющие сигналы, передаваемые от цифрового двойника физическому объекту;
- 4) необходимость действий – это указание: надо или не надо выполнять соответствующее действие для каждой из комбинаций условий [2].

Условия могут быть представлены различными способами: перечислимым множеством, в частном случае – бинарным, функцией булевой алгебры, функцией нечеткой логики. Использование механизма структурного полиморфизма позволит минимизировать количество процедур выборки и обработки данных за счет обращения только к тем элементам структуры данных, которые являются значимыми для описываемого события.

Действия могут быть либо элементарными – вызывать отдельный метод обработки данных, либо сложными – ссылаться на другие таблицы решений. Взаимодействие тех и других называется каскадом таблиц решений. Если порядок выполнения действий имеет значение, то действия представляются упорядоченным списком, в противном случае – неупорядоченным. Упорядоченный список определяет приоритет применения методов обработки данных цифровой модели. Параметрический полиморфизм позволяет описывать универсальные методы работы с данными и использовать их на разных наборах типов данных.

С точки зрения расширения описательных возможностей таблиц решений наибольший интерес представляют их модификации – упорядоченные каскадные таблицы решений [1] и ансамбли таблиц решений, при использовании которых выход для одной ТР может являться входом для другой. Ансамбль таблиц решений – это такой их набор, который обеспечивает получение нового решения на основе продукционных правил таблиц, участвующих в ансамбле, при этом каждая из таблиц решений остается неизменной и независимой от любых других. В ансамбль могут включаться новые таблицы решений, если на то есть необходимость.

Выходной поток данных из таблиц решений позволяет реализовать связь между цифровой тенью и объектами технической системы, что обеспечивает поддержку реализации цифрового двойника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование механизмов структурного и параметрического полиморфизма совместно с ансамблем таблиц решений позволяет выйти на полноценное использование цифровых двойников сложных технических систем. Структурный полиморфизм можно использовать для одинаковых методов работы с элементами цифровых моделей различных физических объектов, а параметрический полиморфизм – для создания цифровой тени, наиболее точно повторяющей объект технической системы. Таблицы решений позволяют обеспечить формирование управленческого воздействия при создании обратной связи между цифровой тенью и физическим объектом, для создания цифрового двойника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication // A Whitepaper by Dr. Michael Grieves, 2014. – URL: http://innovate.fit.edu/plm/documents/doc_mgr/912/1411.0_Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grieves.pdf (дата обращения: 10.12.2018).
2. Negri E., Fumagalli L., Macchi M. A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems // 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing – FAIM2017 (27-30 June 2017, Modena, Italy). – Modena: Procedia Manuf., 2017. – №11. – P. 939–948.
3. Boschert S., Rosen R. Digital Twin – The Simulation Aspect // Mechatronic Futures / eds. P. Hehenberger, D. Bradley. – Cham (Switzerland): Springer, 2016. – P. 59–74.
4. Rosen R., von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K.D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing // IFACPaper-Online. – 2015. – Vol. 48(3). – P. 567–572.
5. Schluse M., Rossmann J. From Simulation to Experimentable Digital Twins - Simulation based Development and Operation of Complex Technical Systems // Second IEEE International Symposium on Systems Engineering – ISSE2016 (October 3–5, Edinburgh, Scotland). – Edinburgh: IEEE Press, 2016. – P. 273–278
6. Kraft E.M. The Air Force Digital Thread/Digital Twin - Life Cycle Integration and Use of Computational and Experimental Knowledge // 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum, (AIAA 2016–0897). – San Diego, CA: United States, 2016. – P. 1–22.
7. Abramovici M., Göbel J.C., Dang H.B. Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems // CIRP Annals – Manufacturing Technology–2016. – Vol. 65(1). – P. 185–188.
8. Шведенко В.Н., Шведенко В.В., Щекочихин О.В. Применение структурного полиморфизма при создании информационных систем процессного управления // научно-техническая информация. Сер. 2. – 2018. – №11. – С. 9-15; Schvedenko V.N., Schvedenko V.V., Shchekochikhin O.V. Using Structural Polymorphism in Creating Process-Based Management Information Systems // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. – 2018. – Vol. 52, № 6. – P. 290–296.
9. Bo Huang. An object model with parametric polymorphism for dynamic segmentation // Journal Geographical Information Science. – 2003. – Vol. 17, № 4. – P. 343–360
10. Mezzini M., Ostermann K. Variability management with feature-oriented programming and aspects // Proceedings of the 12th ACM SIGSOFT symposium on Foundations of software engineering. – New York (NY): ACM Press, 2004/ – P. 127–136.
11. Common Object Request Broker Architecture (CORBA), v2.4.2. Revision2.4 (February 2001), OMG Specification, 2001. P 3-1. – URL: <https://www.omg.org/spec/CORBA/2.4.2/About-CORBA/> (дата обращения: 10.12.2018).
12. Dragan L., Watt S.M. Parametric Polymorphism Optimization for Deeply Nested Types in Computer Algebra // Maple Summer Workshop. – Waterloo (Canada), 2005. – P. 243–259.
13. Gesbert N., Genevès P., Layaïda N. Parametric polymorphism and semantic subtyping: the logical connection // Proceedings of the 16th ACM SIGPLAN International Conference on Functional Programming – ICFP 2011 (September 19–21, 2001 Tokyo, Japan). – Tokyo, 2001. – P. 107–116.
14. Vouillon J. Polymorphic regular tree types and patterns // POPL '06: Conference Record of the 33rd ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages. – New York (NY): ACM Press, 2006. – P. 103–114.
15. Dragan L., Watt S.M. Performance Analysis of Generics in Scientific Computing // Proc. 7th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms in Scientific Computing – SYNASC 2005 (Sep 25–29 2005, Timisoara Romania). – Los Alamitos, CA: IEEE Press, 2005. – P. 93–100.
16. Castagna G., Xu Z. Set-theoretic foundation of parametric polymorphism and subtyping // Proceedings of the 16th ACM SIGPLAN international conference on Functional programming (September 19–21, 2011, Tokyo, Japan). – Tokyo, 2011. – P. 94–106.
17. Oancea C.E., Watt S.M. Parametric Polymorphism for Software Component Architectures // Proceedings of the 20th Annual ACM SIGPLAN Conference on Object-Oriented Programming, Systems, Languages, and Applications – OOPSLA 2005 (October 16–20, 2005, San Diego, CA, USA). – New York (NY): ACM Press, 2005.
18. Jagadeesan R., Jeffrey A., Riely J. Typed parametric polymorphism for aspects // Science of Computer Programming. – 2006. – Vol. 63(3). – P. 267–296.

Материал поступил в редакцию 11.01.19.

Сведения об авторах

ШВЕДЕНКО Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, ведущий специалист ВИНТИ РАН, Москва
e-mail: vv_shved@mail.ru

ШВЕДЕНКО Валерия Валериевна – кандидат экономических наук, системный аналитик ООО "РЕГУЛ+", Санкт-Петербург
e-mail: vv_shved@mail.ru

ЩЕКОЧИХИН Олег Владимирович – кандидат технических наук, доцент, инженер информационной безопасности ООО "ММТР", Кострома
e-mail: slim700@yandex.ru