

# ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В КОНТЕКСТЕ ИНДУСТРИИ 5.0

Разумовский А.И.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

razumowsky@yandex.ru

*Аннотация. В докладе представлен концептуально-практический подход к формированию в рамках индустрии 5.0 эксплуатационной основы цифровых двойников (ЦД). Методом когнитивного метамоделирования ЦД проведено исследование порядка разработки и использования когнитивных оболочек-метамоделей, позволяющих осуществлять создание, коррекцию, масштабирование и внедрение произвольной сложности ЦД производств и их продуктов.*

*Ключевые слова: индустрия 5.0; цифровой двойник, метамоделирование, визуализация данных, 3D-модели, обмен информацией, перманентное внедрение.*

## Введение

В насущной научно производственной деятельности, в условиях агрессивной цифровой трансформации, чрезвычайно актуален статус перманентного соотношения физической модели и ее виртуальной цифровой формы в течение всего жизненного цикла изделия. Управление жизненным циклом продукта — это деятельность, направленная на наиболее эффективный контроль над исследованием, разработкой, эксплуатацией и утилизацией промышленного продукта, начиная с самого первого плана и заканчивая его списанием. Такая деятельность позволяет компании увеличивать доходы за счет совершенствования инноваций, сокращения сроков вывода на рынок новых продуктов и предоставления качественной поддержки и сервисов для существующих продуктов. Кроме того, управление жизненным циклом позволяет обеспечить эффективное функционирование продуктов и их использование клиентами [1].

Идея жизненного цикла продукта была предложена Динем [2] в 1950 году. Первоначально под жизненным циклом продукта понимался процесс от принятия рынком до завершающего уничтожения. Стратегически жизненный цикл продукта был разделен на четыре этапа: внедрение, рост, зрелость и упадок [3]. С развитием параллельной инженерии [4] жизненный цикл продукта был распространен и на инженерную сферу. А жизненный цикл продукта был пересмотрен, чтобы охватить весь процесс - от анализа спроса на продукцию, проектирования, производства, продаж и послепродажного обслуживания до вторичной переработки [5].

Существуют также некоторые проблемы, связанные с управлением данными о продукте и их контроле на разных этапах жизненного цикла продукта. Во-первых, данные, генерируемые на различных этапах всего жизненного цикла продукта, могут иметь рассогласованные цели и задачи. Во-вторых, могут образовываться информационные лакуны между данными разных этапов жизненного цикла продукта. В-третьих, на разных этапах жизненного цикла продукта возникает много дублирующихся данных. Разнообразие данных часто мало привлекает исследователей и пользователей информационных систем, поскольку эти дублирующиеся данные часто приводят к потере большого количества ресурсов и проблемам их совместного использования. В-четвертых, взаимодействие и повторяемость между анализом больших данных и различными видами деятельности на протяжении всего жизненного цикла продукта в значительной мере отсутствуют. Таким образом, анализ-синтез данных и действительный производственный процесс нельзя соотносить непосредственно. В-пятых, современные программные решения анализа данных предпочитают физические данные о продукте, а не данные из расчетных моделей.

Индустрия 5.0 добавляет еще один компонент такого соотношения: когнитивное участие человека. Цифровой двойник (ЦД) изначально рассматривается как виртуальный аналог физических объектов, который может отражать их физическое поведение, производительность и интеграцию. Концептуально основополагающим звеном ЦД является связь между физическими объектами и их цифровыми представлениями, что позволяет совершенствовать физические объекты. Для разработки программных систем взаимодействия виртуальных и физических объектов важно создать особое пространство для такого взаимодействия. В нем присутствуют не сами модели физического мира, а их предыстория, выраженная через значимость, ценностную политику и эволюцию, а также когнитивная поддержка и руководство со стороны людей. Такую среду уместно назвать метасредой, а модели в ней - метамоделями.

Целью программной системы стало бы достижение максимально гибкого и отзывчивого соотнесения виртуальных и физических объектов, с отчетливым и адекватным отображением всех насущных свойств, прогнозов и реакций.

Метамоделю — это возможность соотнесения не только физического с цифровым виртуальным миром, но и структурного аспекта развития и функционирования модели с ее когнитивной поддержкой, когда окажется удобно осуществлять «подсказку» автоматизированному процессу или непосредственно влиять на совершенствование физического объекта.

История появления ЦД ведется с 2010 года, когда НАСА сделала попытку улучшить моделирование космических аппаратов [7]. Потребность интеграции человеческого суждения в формальный процесс моделирования была описана впервые в работе Джозефа Фикселя на основе теории нечетких множеств [8]. Объединяя эти два аспекта, открывается перспектива формирования и поддержки коммуникации физического воплощения с его цифровой формой при непосредственном участии и контроле со стороны человеческого знания, опыта и ответственности [9].

Как исходное положение примем, что разработка программной системы метамоделирования (ПСМ) ЦД должна базироваться на принципе гибкости взаимоотношений между моделями, физическими объектами, коммуникативными процессами и человеческим участием. Поскольку сами модели могут быть различной степени сложности, многообразного взаимодействия, возможностей дополнения и встраивания, для достижения гибкости важно интегрировать в метамоделю элемент «посредник» для предотвращения прямого доступа к моделям, а также возможно некоторым элементам программной системы. Кроме того, с помощью «посредника» можно будет варьировать учет различных аспектов соединения и динамики моделей и процессов: слияние данных, использование разнообразных мониторинговых подсистем и сред интерпретации.

## 1. Метод

Задача ПСМ ЦД - обеспечить последовательное создание, сопровождение и развитие ЦД для промышленных объектов, включая процессы и продукты. В контексте этой задачи важно признать необходимость получения гибких форм взаимодействия между ЦД и физическими объектами, а также между моделями и интерфейсами системы.

Структурное содержание системы должно охватывать:

- состав и конфигурации всех создаваемых моделей;
- конфигурацию функциональных режимов модели и других динамических операций;
- информацию о фактической динамике модели, включая циклограммы и контактные функции;
- данные о массовых и геометрических свойствах моделей;
- информацию о мониторинге динамики модели, включая показания датчиков температуры и тензометрических датчиков;
- записи обо всех операциях, запланированных и выполненных в ходе разработки и эксплуатации модели.

В рамках информационной модели системы метамоделирования ЦД предположим, что между содержательной частью ЦД и каналами связи и их интерфейсами существует дополнительный слой. Придадим этому элементу статус посредника, изобразив его в виде оболочки любого носителя информации.

Рисунок 1 представляет распространение данных от ЦД  $DT(1...N)$  к физическому образцу  $PHO(1...N)$  и обратно. Здесь прохождение любой информации обеспечивается коммуникационными каналами  $Com(1...N)$  и накоплением знаний о физическом объекте в ЦД либо формированием изменений физического объекта.

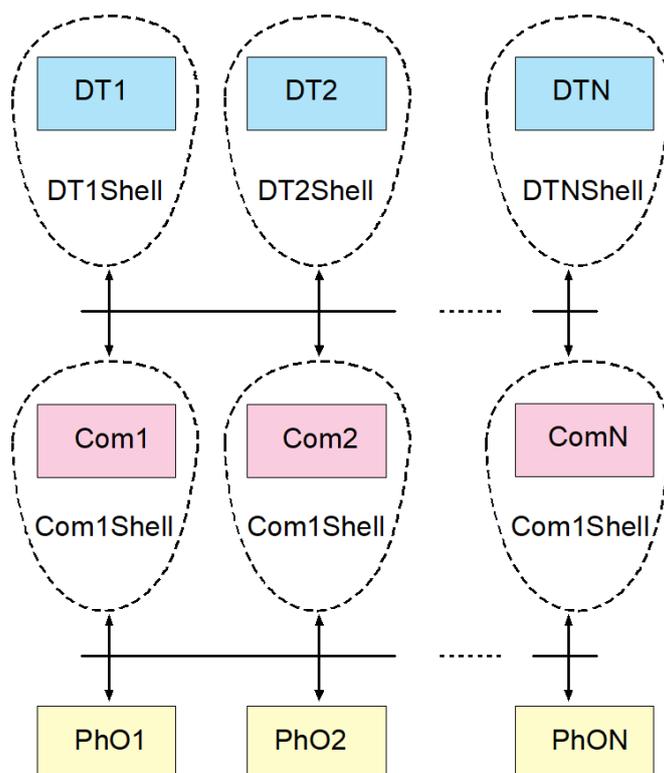


Рис. 1. Информационная модель ЦД с метамоделями-посредниками

Особенностью представленной модели является не нарушение киберфизического обмена данными между ЦД и его физическим образцом, но формирование оболочек вокруг ЦД и коммуникационных каналов, позволяющих обуславливать их текущее и будущее представление в связи с поведением, а, значит, и гибкость в разработке, внедрении и эксплуатации. Иначе говоря, ЦД оказывается в подобии «скорлупы», которая скрывает процесс его когнитивного «вызревания» или коррекции.

Формальное содержание может быть выражено следующим образом:

$$Sh_N^{DT} = \{DT(I(F))\} \quad (1)$$

$$Sh_N^C = \{C(I_c(F_c))\} \quad (2)$$

Где  $Sh_N^{DT}$  и  $Sh_N^C$  - объекты-оболочки двух типов, оболочка цифрового двойника и канала передачи данных, а  $I$  и  $F$  - образы и функционально- алгоритмические решения, производимые внутри оболочки.

Развивая формализм, можно описать общий процесс взаимодействия, включив в него данные физического объекта.

$$P = \sum_N (Sh_i^{DT} \cup Sh_i^C \cup PhO_i) \quad (3)$$

В терминах синхронизации состояния объектов, используя отношение эквивалентности, можно записать:

$$P \leftrightarrow D, \quad (4)$$

где  $P$  - состояние физического объекта, а  $D$  - состояние его ЦД.

Для полноты формально опишем также состояние обратной связи и обновление модели.

Обратная связь формирует необходимую реакцию, основываясь на рабочем состоянии ЦД ( $D$ ) и нежелательном его состоянии ( $Ex$ ):

$$D \wedge \neg Ex \rightarrow S, \quad (5)$$

где  $S$  - действие системы управления.

Наконец обновление модели происходит через определенное время ( $\Delta T$ ), если состояния ЦД и физического объекта не совпадают:

$$(D \neq P) \wedge \Delta T \rightarrow \text{Upd}(D) \quad (6)$$

И учитывая оболочку над ЦД:

$$D \wedge C(D) \rightarrow MM, \quad (7)$$

где  $C$  – когнитивная оболочка цифрового объекта,  $MM$ - интегрированная метамодель.

Оболочка-скорлупа в совокупности с содержащимся внутри ЦД или коммуникационным интерфейсом представляет собой метамодель. В функциональность оболочки метамодели включается генерация инструкции ЦД или коммуникации. Инструкция может быть выражена полуформально, соединяя содержательную и абстрактную часть ЦД, а также его взаимодействия с прочими элементами окружающего контекста. Описания-инструкции представляют собой структурно связанные данные, подобно записям при каталогизации в библиотечных технологиях, например [10]. Отличают же описательную оболочку метамодели ЦД от практики библиотечной каталогизации наличие нестандартных, произвольных формулировок. Это не позволяет делать такие описания расчетными и, соответственно, автоматизировать их. Однако в произвольной форме инструкций кроется значительный плюс выразительности, конкретности и независимости от объекта описания. Описания могут содержать как непосредственную информацию о ЦД или его деталях, так и сопроводительные контексты, пожелания, списки недостатков и особенностей. Важно отметить, что инструкция-описание является не только физической или информационной оболочкой ЦД или коммуникационного канала, но выполняет виртуальную роль «сотрудничества» ЦД с человеком, его опытом, идеями и целеустремленностью.

Непосредственное участие индивидуальных способностей человека в придании ЦД и коммуникационным интерфейсам когнитивной силы, способствует преодолению существенных барьеров на путях раннего внедрения ЦД, а также масштабирования программной системы их метамоделирования. Действенный когнитивный фактор также позволит интегрированной с ЦД системе проявлять когнитивные способности для обнаружения сложных и непредсказуемых действий, реакций и рассуждений о стратегиях динамической оптимизации процессов для поддержки принятия решений [6]. Масштабирование часто является процессом реакции на изменение эксплуатационной ситуации, в первую очередь - трансформацию технических, социальных и программных требований. Вследствие этого отсутствие когнитивной составляющей в принятии автоматизированного решения, определенно лишит систему гибкости, в плане исправления ошибок, а также отсутствие стратегического видения при масштабировании.

## 2. Масштабирование и перманентное внедрение

Организационное внедрение и масштабирование считается одним из наиболее стратегически важных процессов в разработке и развертывании современных технических производственных систем [11]. Любая производственная система, процесс или механизм требуют вмешательства человека. Более того, иногда такое вмешательство требуется незамедлительно. Другими словами, необходимо создать условия для готовности к вмешательству. Процессы внедрения и масштабирования считаются сложными для организации и поддержки [12].

Можно соотнести или изменить описание с фактической реализацией, основываясь на описании компакт-дисков и каналов связи, которые, как правило, могут содержать любую информацию. Также целесообразно создавать автономные тестовые модели вне ЦД для отладки и проверки, поскольку реальная реализация, включая тестовые процедуры, лишь декларативно связана с оболочкой. Если результаты окажутся успешными, эти модели можно будет включить в состав ЦД. Такой подход позволит масштабировать систему, постоянно усиливать ее функциональность. Это также предоставит возможность проводить проверки пригодности и работоспособности отдельных элементов вне ЦД. Таким образом, появляется возможность проведения перманентного внедрения ЦД на ранних стадиях его создания.

Фактически, процесс внедрения окажется сопутствующим каждому из последовательных шагов жизненного цикла: исследование, проектирование, разработка, проверка, эксплуатация (рис. 2). Подобный подход сегодня практикуется при внедрении, например, киберфизических систем [13], когда информация со всех связанных узловых точек управления тщательно отслеживается и синхронизируется между физическим производственным цехом и кибернетическим вычислительным пространством. Подобную же архитектуру предлагают в работе [14], где создаются специальные протоколы в качестве компонентов фреймворка для идентификации и локального сдерживания неправильно работающих или неисправных узлов, а затем для их вытеснения из системы.

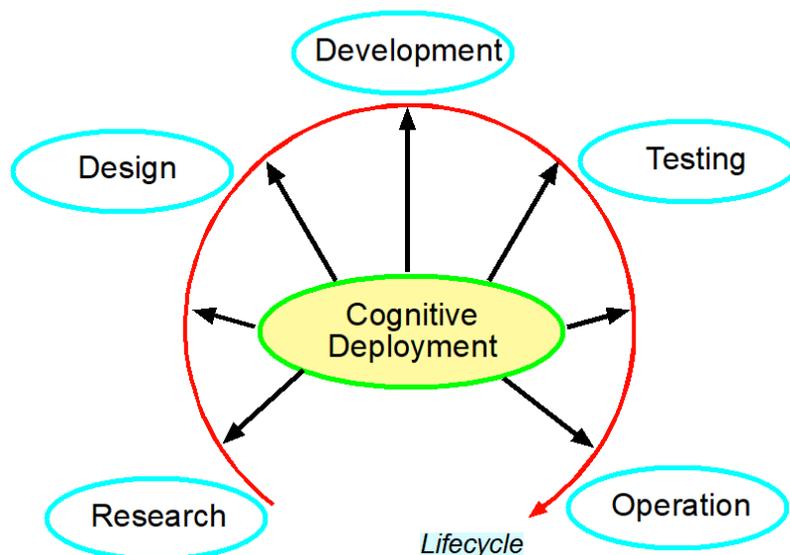


Рис. 2. Качественная модель перманентного (систематического) внедрения

Перманентное внедрение создает важное преимущество, как в контроле над реализацией планов и целей, так и в обслуживании. Кроме того, отмечается критический уровень такого перманентного внедрения в жесткой связности требований и эксплуатационной практики [15].

При создании такой само интегрированной архитектуры процессов жизненного цикла под «надзором» внедрения, представляется возможным осуществлять низко рисковое наращивание функционала, а также планировать и обеспечивать масштабирование ЦД.

### 3. Заключение

Идея метамоделирования, отделяющая описание модели от ее непосредственного содержания, очень продуктивна, поскольку создает гибкость в цепочке взаимодействий - человек / ЦД / коммуникационный канал / физический объект. Кажется парадоксальным, но человек по-прежнему играет решающую роль в этой цепочке взаимозависимостей. Когнитивные интервенции более важны, поскольку их содержание не основано на строгих формальных отношениях и, следовательно, не подлежит техническому регулированию. Напротив, их творческое содержание представляет собой реальную, а не воображаемую силу в разработке строгих и комплексных решений.

Следует также рассмотреть вопрос о развитии идеи когнитивной оболочки, содержащей разнообразные описания ЦД, и организации целевой группы для вмешательства в функциональные процессы ЦД в виде своеобразного компактного института экспертов с разнообразными знаниями. Это открыло бы возможность "выращивания", тестирования, масштабирования, внедрения и развития ЦД в ответ на непредвиденные потребности. В окончательном варианте эту идею можно было бы с полным основанием назвать лабораторной оболочкой ЦД. Среди ее задач - разработка, постоянное внедрение и эксплуатация чрезвычайно сложных комплексов ЦД в объединенном пространстве, в обществе профессионалов, работающих вместе.

### Литература

1. Stark J. Product lifecycle management (PLM) //Product Lifecycle Management (Volume 1) 21st Century Paradigm for Product Realisation. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – С. 1-32.
2. Dean J. Pricing policies for new products //Harvard Business Review. – 1950. – Т. 28(6). – С. 45-53
3. Rink D. R., Swan J. E. Product life cycle research: A literature review //Journal of business Research. – 1979. – Т. 7. – №. 3. – С. 219-242.
4. Nevins J.L., Whitney D.E. Concurrent design of products and processes: a strategy for the next generation in manufacturing. McGraw-Hill Companies, New York. 1989. С.538
5. Ryan C., Riggs W. E. Redefining the product life cycle: The five-element product wave //Business Horizons. – 1996. – Т. 39. – №. 5. – С. 33-40
6. Yitmen I. et al. An adapted model of cognitive digital twins for building lifecycle management //Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – №. 9. – С. 4276.
7. Glaessgen E., Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles //53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA. – 2012. – С. 1818.

8. *Fiksel J.* Computerizing the crystal ball: Toward a metamodeling capability //Technological Forecasting and Social Change. – 1980. – T. 17. – №. 3. – C. 201-210.
9. *Zhou G. et al.* Knowledge-driven digital twin manufacturing cell towards intelligent manufacturing //International Journal of Production Research. – 2020. – T. 58. – №. 4. – C. 1034-1051.
10. *Connaway L. S., Dickey T. J.* Publisher names in bibliographic data //Library Resources & Technical Services. – 2011. – T. 55. – №. 4. – C. 182-194.
11. *Amit R., Schoemaker P. J. H.* Strategic assets and organizational rent //Strategic management journal. – 1993. – T. 14. – №. 1. – C. 33-46.
12. *Bakulina, O., Lehan, I., Bakhov, I.* Cluster associations as a factor of innovative and integrative development of the economy //International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2019. – T. 8(10). – C. 2249-2255.
13. *Lee J., Bagheri B., Kao H. A.* A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems //Manufacturing letters. – 2015. – T. 3. – C. 18-23.
14. *Raya M. et al.* Eviction of misbehaving and faulty nodes in vehicular networks //IEEE journal on selected areas in communications. – 2007. – T. 25. – №. 8. – C. 1557-1568.
15. *Giannoulis S. et al.* Wireless sensor network technologies for condition monitoring of industrial assets //Advances in Production Management Systems. Competitive Manufacturing for Innovative Products and Services: IFIP WG 5.7 International Conference, APMS 2012, Rhodes, Greece, September 24-26, 2012, Revised Selected Papers, Part II. – Springer Berlin Heidelberg, 2013. – C. 33-40.