

О. В. Мясникова

Институт бизнеса БГУ, Минск, Беларусь, miasnikovaovl@gmail.com

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КАК ИНСТРУМЕНТЫ ИХ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Статья посвящена вопросам проектирования производственно-логистических систем в условиях цифровой трансформации. Цель исследования выделить и систематизировать методические подходы использования цифровых двойников в ходе моделирования производственно-логистических систем. Описано применение непрерывного инжиниринга в механизме формирования производственно-логистических систем. Предложена методика построения цифрового двойника системы на базе создания и интеграции цифровых двойников продуктов, производственных процессов, потоков и систем управления. Выводы и методика модельно-ориентированного проектирования производственно-логистической системы будут полезны при проведении ее цифровой трансформации.

Ключевые слова: *производственно-логистическая система, цифровые двойники, моделирование систем, модельно-ориентированное проектирование, инновации, цифровая трансформация*

O. Miasnikova

School of Business of BSU, Minsk, Belarus, miasnikovaovl@gmail.com

DIGITAL TWINS OF PRODUCTION AND LOGISTICS SYSTEMS AS TOOLS FOR THEIR MODELING

The article is devoted to the design of production and logistics systems in the context of digital transformation. The purpose of the study is to identify and systematize methodological approaches to the use of digital twins in the course of modeling production and logistics systems. The application of continuous engineering in the mechanism of formation of production and logistics systems is described. A method of constructing a digital twin of the system based on the creation and integration of digital twins of products, production processes, flows and control systems is proposed. Conclusions and methodology of model-oriented design of the production and logistics system will be useful in carrying out its digital transformation.

Keywords: *production and logistics system, digital twins, system modeling, model-oriented design, innovations, digital transformation*

Производственно-логистическая система (ПЛС) – это сложная, динамичная, экономическая, открытая, адаптивная система с обратной связью, состоящая из относительно устойчивой совокупности звеньев цепи создания ценности, взаимосвязанных в пределах цикла производства в едином процессе управления материальными, сервисными и сопутствующими им потоками, обеспечивающих придание им количественных параметров и качественных характеристик в соответствии с требованиями внешней среды [1; 2]. В работах сформулированы теоретические основы, концепция и методология проведения цифровой трансформации ПЛС. Разработанные модели влияния технологий цифровой экономики на базовые элементы ПЛС [3], стратегические решения и инструменты цифровизации ПЛС систематизированы в авторской спиральной модели и сценариях изменения ПЛС в ходе цифровой трансформации [4]. В методологических подходах к созданию программы цифровой трансформации ПЛС [5] показана необходимость применения системного и непрерывного инжиниринга и использования Lean + Agile подхода для синхронизации проектных работ в условиях неопределенности. В развитии данной проблематики в настоящей статье

нами рассматривается методика построения цифрового двойника системы для моделирования ее структуры и поведения.

Моделирование производственно-логистических систем является неотъемлемой стадией формирования ПЛС. Системный и непрерывный инжиниринг становятся основной проектной методологией, подходом к созданию сложных систем, к которым относятся и ПЛС. *Цифровой двойник* как цифровое представление является актуальной и точной копией свойств и состояний объекта – продукта, процесса или услуги. Он позволяет выполнять мониторинг, анализ и оптимизацию объекта в виртуальном пространстве, изменяя форму и положение, модулируя изменения, что позволяет лучше понимать, прогнозировать и оптимизировать происходящие с объектом процессы [6]. Цифровой двойник как матрица требований и ограничений предназначена для рациональной «балансировки» большого количества целевых характеристик как объекта в целом, так и его компонентов в отдельности, которые, как правило, конфликтуют между собой как на одном этапе, так и на разных стадиях жизненного цикла, как указывает профессор А. И. Боровков [7]. Объединение цифрового двойника объекта / продукта и цифрового двойника производства в рамках единой цифровой модели на основе выполнения десятков тысяч виртуальных испытаний в процессе «цифровой сертификации» ведет к формированию «умного» цифрового двойника первого уровня. Уровень адекватности цифрового двойника повышает «умная» цифровая тень объекта, создаваемая за счет оперативной информации о функционировании конкретного объекта / продукта при помощи промышленного интернета вещей и диагностики [8]. Применение ЦД позволяет проектировать Виртуальные фабрики [9]. Технология цифровых двойников (ЦД) применима для формирования ПЛС как совокупности сложных, комплексных разнородных объектов различной природы – физических, социальных, информационных.

Методика построения цифрового двойника ПЛС базируется на создании и интеграции цифровых двойников продуктов, активов, производственных процессов, потоков, системы управления. Цифровой двойник системы как ее виртуальная модель представляет собой совокупность:

- цифровых двойников выпускаемых продуктов;
- цифровых двойников производственных активов (оборудования, транспортных средств, инструмента), рабочих, элементов инфраструктуры;
- цифровых двойников технологических процессов как алгоритмизированного набора правил выполнения процессов обработки, перемещения, хранения и иных действий для создания продукта;
- цифровых двойников производственных процессов как матрицу связей и зависимостей, описывающих состояние производственных активов, их взаимосвязи и обусловленности поведения исходя из технологии и организации производства;
- цифровых двойников системы потоков как объекта управления в ПЛС, отражающих характеристики потоков в движении, представленных в виде сетевых структур с учетом матрицы требований / целевых показателей, пределов отклонений и ресурсных (временных, финансовых, технологических, производственных, экологических и т. д.) ограничений
- цифровых двойников системы управления как алгоритмизированного набора правил приема, обработки, анализа данных и выработки и передачи управленческого воздействия на элементы потока.

Цифровой двойник продукта представляет собой многоуровневую матрицу целевых показателей его функционала и ресурсных ограничений (ресурсных, технологических, экономических, экологических) его состава. ЦД как математическая модель продукта раскладывается как иерархическая система матриц, конкретизированных по уровню детализации элемента материального потока на цепочку «продукт – узлы – детали – заготовки – материалы – сырье». В свою очередь на базе ЦД продукции необходимо выстроить *цифровой двойник технологических процессов*, что

позволить подбирать активы в механизм исполнения и потенциальных участников ПЛС под требования ограничений. PMI-данные из 3D-моделей как цифровые двойники могут передаваться в САМ-систему, где принимаются решения о технологии обработки в зависимости от требований конкретного заказа.

Механизм исполнения процессов включает в себя совокупность производственных активов (оборудования, транспортных средств, инструмента), рабочих, элементов инфраструктуры, которые также фиксируются в *цифровых двойниках активов*. Физический объект необходимо оцифровать и определить технические и эксплуатационные параметры (например, размеры, скорость и мощность двигателя), в то время как рабочие параметры описывают свойства соответствующих производственных процессов. Основываясь на входных параметрах и ограничениях производственной системы, результатом внедрения ЦД является управление реальной ПЛС в режиме реального времени, для чего используются алгоритмы для определения субоптимального производственного плана [10]. Сбор и обработку информации обеспечивают SCADA-системы (Supervisory Control And Data Acquisition). Они аккумулируют информацию о состоянии оборудования и технологических процессов.

Цифровой двойник производственных процессов создается исходя из требований и ограничений продукции и технологии путем комбинации активов, элементов инфраструктуры и подбора рабочих. ЦД производственных процессов описывает комбинации действий, объемов ресурсов различной природы, необходимые для создания продукции. Элементы изделия, оцифрованные по единым стандартам платформы и представленные в виде 3D-моделей, становятся пулом производственных «заказов», размещенных в системы управления производством (Manufacturing Execution Systems, MES) предприятия. Как нами выявлено, производственные заказы также могут быть переданы на цифровые платформы, если принято решение о производственном аутсорсинге. Унифицированные типовые изделия, элементы и узлов, доведенные до потенциальных участников ПЛС в виде данных, четко структурированных и легко интегрируемых в ИТ-систему, не только позволяют повысить скорость «подборки» внешнего участника в ПЛС, но и ускорить сам процесс освоения нового изделия.

Цифровой двойник системы потоков как объекта управления в ПЛС, отражающих характеристики потоков в движении. Потоки элементов изделия перемещаются во времени и пространстве с определенной скоростью. При этом происходит изменение их свойств, формы, полезности. В моделировании потоки представляются в виде сетевых структур (графов), где движение отражается стрелкой, а событие кружком. Совокупность информации о потоках, звеньях, элементах системы образует в цифровой форме многоуровневую матрицу и включает целевые показатели и ресурсные ограничения (ресурсные, технологические, экономические, экологические). ЦД системы потоков выступает как алгоритмизированный набор правил движения / остановки элементов потока, с учетом матриц требований / целевых показателей, норма и пределов отклонений и ресурсных ограничений, пропускной способности активов, их места нахождения и доступности, предельной скорости выполнения процессов обработки, перемещения, хранения и иных действий для создания продукта. Особое внимание при моделировании системы потоков следует уделить потерям и выстраиванию замкнутых контуров движения ресурсов в том числе замкнутых цепей поставок.

Цифровые двойники системы управления как алгоритмизированные набор правил приема, обработки, анализа данных и выработки и передачи управленческого воздействия на элементы потока воплощены в системы управления предприятием: MES (Manufacturing Execution Systems) – система управления производственными процессами, включающая модули управления логистическими цепочками SCM; усовершенствованного планирования и составления производственных графиков APS (Advanced Planning and Scheduling); управления взаимоотношениями с клиентами –

CRM; управления данными об изделии PDM (Product Data Management); окончательного (детализированного) планирования ресурсов FRP (Finite Resource Planning). Существует проблема хранения данных в неинтегрированных системах («Silo problem»), когда информация создается большим числом приложений от разных вендоров в файлах различных форматов в CAD-, в Excel-файлах, в PDF, в SysML-моделях. Возникает задача создать единую, унифицированную модель системы, из которой могли бы быть сформированы все данные и представления об ПЛС, т. е. *цифровой двойник ПЛС*. Эти данные должны быть непротиворечивыми, согласованными, сгенерированными из «единого источника истины». ЦД ПЛС объединяет в едином цифровом пространстве различные элементы общей модели, которые находятся в разных подмоделях и базах данных. Это позволяет бесшовно передавать данные из одного инструмента в другой и синхронизировать все параметры модели по мере развития общей модели, визуализировать процесс совместной работы и отслеживать точки принятия решений на разных этапах проектирования.

В заключении следует указать, что в разработанном механизме формирования ПЛС применение методологии системной инженерии на основе моделей является базовым инструментом. Создание цифровых двойников продуктов, активов, производственных процессов, потоков и систем управления в совокупности позволяет сформировать цифровой двойник ПЛС. Сценарное моделирование позволит смоделировать оптимальное движение потоков в системе. ЦД ПЛС позволит обеспечить гибкость, способность изменять конфигурацию под индивидуальные требования клиентов, ускорить выход новых продуктов на рынок, устойчиво функционировать в случае технологических или информационных сбоев и отклонений, сглаживать негативные последствия колебаний спроса.

Список использованных источников

1. Мясникова, О. В. Развитие логистических систем в условиях цифровой трансформации бизнеса / О. В. Мясникова. – Минск : Колорград, 2019. – 203 с.
2. Мясникова, О. В. Развитие производственно-логистических систем: теория, методология и механизмы цифровой трансформации / О. В. Мясникова. – Минск : Ин-т бизнеса БГУ, 2021. – 267 с.
3. Мясникова, О. В. Модель влияния технологий цифровой экономики на базовые элементы производственно-логистических систем / О. В. Мясникова // Экономика. Управление. Инновации. – 2021. – № 2 (10) – С. 53–59.
4. Мясникова, О. В. Спиральная модель и сценарии изменения производственно-логистических систем в ходе цифровой трансформации / О. В. Мясникова // Бизнес. Инновации. Экономика : сб. науч. ст. / Ин-т бизнеса БГУ. – Минск, 2022. – Вып. 6. – С. 229–238.
5. Мясникова, О. В. Программа цифровой трансформации производственно-логистических систем: методические аспекты разработки / О. В. Мясникова // Цифровая трансформация. – 2022. – № 4 (28). – С. 18–27.
6. Digital twin for smart manufacturing: a review of concepts towards a practical industrial implementation / Luca Lattanzi [et al.] // International J. of Computer Integrated Manufacturing. – 2021. – Vol. 34 (6). – P. 567–597. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2021.1911003>
7. Боровков, А. И. Цифровые двойники и цифровые тени в высокотехнологичной промышленности [Электронный ресурс] / А. И. Боровков. – Режим доступа: <https://4science.ru/articles/Cifrovie-dvoyniki-i-cifrovie-teni-visokotehnologichnoi-promishlennosti>. – Дата доступа: 25.02.2023.
8. Прохоров, А. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт / А. Прохоров, М. Лысачев. – 1-е изд., испр. и доп. – М. : ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.
9. Manufacturing System Design with Virtual Factory Tools / X. Yang [et al.] // International J. of Computer Integrated Manufacturing. – 2015. – Vol. 28 (1). – P. 25–40. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2013.800948>
10. A Five-Step Approach to Planning Data-Driven Digital Twins for Discrete Manufacturing Systems / M. Resman [et al.] // Applied Sciences. – 2021. – Vol. 11 (8). – P. 36–39. <https://doi.org/10.3390/app11083639>