

УДК 658.51

doi: 10.18698/0536-1044-2023-5-37-48

Разработка типовых архитектур цифровых двойников производственно-логистических систем машиностроительных предприятий на разных стадиях их жизненного цикла^{*}

П.А. Никишечкин, В.А. Долгов, С.Н. Григорьев

ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»

Development of the digital twins' typical architecture in the mechanical engineering enterprise production and logistics systems at different stages of their lifecycle

P.A. Nikishechkin, V.A. Dolgov, S.N. Grigoriev

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Moscow State University of Technology STANKIN

Совершенствование информационных технологий изменяет подходы к управлению жизненным циклом продукта и сложными системами, а также методы исследования сложных процессов. В последнее время все большее развитие получает направление цифровых двойников объектов, процессов и систем, что предполагает создание их виртуальных копий, с помощью которых можно исследовать и прогнозировать поведение рассматриваемого объекта. Приведена обобщенная архитектура цифровых двойников объектов, в число которых входят продукты, процессы и системы. Изложены вопросы построения цифровых двойников для машиностроительного предприятия. Показано, что для различных объектов одного и того же машиностроительного предприятия можно разработать множество цифровых двойников, каждый из которых будет решать свои задачи. Рассмотрены цифровые двойники производственно-логистической системы машиностроительного предприятия, его типовая архитектура и изменения цифрового двойника на различных стадиях ее жизненного цикла. Показано, что построение цифровых двойников производственно-логистической системы на различных стадиях ее жизненного цикла обеспечивает поддержку принятия организационно-технологических решений с целью повышения эффективности производственно-логистической системы. Описаны основные классы информационных систем, используемые для построения цифровых двойников производственно-логистической системы на стадиях проектирования и эксплуатации.

Ключевые слова: цифровой двойник объекта, машиностроительное предприятие, производственно-логистическая система, архитектура цифровых двойников, жизненный цикл, информационная система

Information technology improvement is changing approaches to managing the product and complex systems life cycle, as well as the methods used in studying the complex processes.

^{*} Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10254 с использованием оборудования центра коллективного пользования «Государственный инженеринговый центр» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 075-15-2021-695 от 26.07.2021, уникальный идентификатор проекта RF-2296.61321X0013).

Recently, digital twins of objects, processes and systems are being increasingly developed, which involves creation of their virtual copies that could be used to investigate and predict behavior of the object in question. Generalized architecture of digital twins of objects, which include products, processes and systems, is provided. Issues of building digital twins for a mechanical engineering enterprise are outlined. It is shown that it becomes possible to design and develop a multicity of digital twins for various objects of the same mechanical engineering enterprise, each of them would solve its specific problems. The paper considers digital twins of the mechanical engineering enterprise production and logistics system, its typical architecture and digital twin alteration at various stages of its life cycle. It is shown that building digital twins of the production and logistics system at various stages of its life cycle provides support in making organizational and technological decisions in order to increase efficiency of the production and logistics system. Main classes of the information systems used to build digital twins of the production and logistics system at the design and operation stages are described.

Keywords: digital twin of an object, mechanical engineering enterprise, production and logistics system, digital twins architecture, life cycle, information system

Развитие информационных технологий (сбора, хранения, передачи и анализа больших массивов данных) достигло качественно нового уровня по сравнению с технологиями, применяемыми 7–10 лет назад. В то время идеи создания цифровых двойников (ЦД) объектов не получили широкой поддержки вследствие технического несовершенства информационных технологий [1–3].

На сегодняшний день можно выделить следующие технологии и методы, позволяющие воплотить в реальность идеи создания ЦД объектов, процессов или систем: технологии высокоскоростных сетей передачи данных, технологии хранения и управления данными, математическое (в частности, имитационное) моделирование, искусственный интеллект и машинное обучение, распределенные, параллельные вычисления и др. [3].

Развитие указанных технологий изменило подходы к управлению жизненным циклом продукта, сложных систем, а также к методам исследования сложных процессов. Понятие ЦД продуктов, процессов и систем предполагает создание их виртуальных копий, с помощью которых можно с достаточной точностью моделировать поведение рассматриваемого объекта.

Первоначально идея и концепция ЦД распространялась только на физические (материальные) объекты и предполагала создание виртуальных моделей, имеющих с ними двустороннюю связь. В настоящее время концепция ЦД охватывает сложные многоуровневые системы, а также физические и химические процессы [1, 3].

Важно отметить, что построение ЦД любого объекта, процесса или системы должно осуществляться в соответствии с конкретными целями и задачами. В противном случае создание цифровой копии объекта, процесса или системы не имеет практического смысла и может нести разве что маркетинговый характер [4].

Цель работы — рассмотреть аспекты построения ЦД производственно-логистической системы (ПЛС) машиностроительных предприятий на различных стадиях ее жизненного цикла для анализа показателей их эффективности, прогнозирования поведения и поддержки принятия организационно-технологических решений.

Типовая архитектура ЦД объектов. Обобщенная архитектура ЦД объекта (продукта/процесса/системы) приведена на рис. 1. Видно, что ЦД является своеобразной надстройкой над объектом, необходимой для анализа пользователем и обеспечения поддержки в принятии решений по управлению его конфигурацией [5–7].

ЦД любого объекта состоит из трех уровней, включая непосредственный (продукт/процесс/система) и виртуальные объекты, а также связи, обеспечивающие взаимодействие физической и виртуальной сущности.

С учетом предложенной типовой архитектуры для построения ЦД необходимо обеспечить:

- взаимосвязь с продуктом/процессом/системой для получения его исходных данных, алгоритмов его функционирования, данных о текущем состоянии и статистике его работы; взаимосвязь может осуществляться путем взаи-

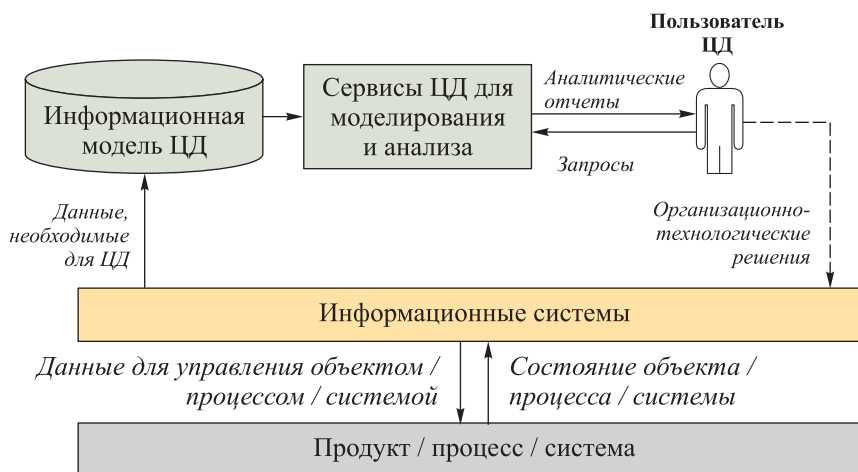


Рис. 1. Обобщенная архитектура ЦД объектов

модействия непосредственно с моделируемым материальным объектом с использованием различных датчиков или через информационные системы, обслуживающие рассматриваемый нематериальный объект;

- создание информационной модели продукта/процесса/системы; при построении ЦД следует определить структуру информационной модели, позволяющей хранить все необходимые данные и алгоритмы для воспроизведения поведения рассматриваемой сущности;

- интеграцию сервисов ЦД для обработки данных информационной модели; в состав сервисов ЦД могут входить системы, решающие задачи обработки данных, анализа, моделирования, а также визуализации и представления данных конечному пользователю ЦД.

Таким образом, пользователь взаимодействует с сервисами ЦД путем формирования необходимых запросов, получая по результатам их работы аналитические отчеты, которые могут содержать статистические данные о функционировании объекта, его фактическом и прогнозируемом состояниях.

На основе сформированных отчетов пользователь ЦД может проанализировать фактическое или моделируемое состояние исследуемого объекта и при необходимости сформировать решения, направленные на корректирование его работы [4, 8–10].

Построение ЦД машиностроительных предприятий. Четвертая промышленная революция, начавшаяся в конце 2010-х годов и породившая концепцию развития промышленных структур «Индустрия 4.0», способствовала по-

вышению уровня информатизации и автоматизации производственных процессов за счет внедрения информационных систем на различных уровнях предприятия, использования систем мониторинга технологических процессов, внедрения новых технологий обработки, развития интеллектуальных систем и т. д. [3, 11–13].

Концепция «Индустрия 4.0» подразумевает построение структур с высоким уровнем сетевой организации, в работу которых вовлечено множество людей, информационных систем, автоматики и машин. Одной из важных составляющих этой концепции является реализация предсказательных способностей по отношению к системам, функционирующим в рамках предприятия (ПЛС, системам безопасности (СБ) и др.), к изготавливаемым изделиям (продуктам) и средствам производства (технологическому оборудованию, оснастке и др.) [11, 14].

Современное машиностроительное предприятие — сложная организационно-техническая система, поэтому рассматривая ЦД в контексте машиностроительных предприятий, можно выделить объекты, для которых построение их ЦД может быть актуальным, нести практическую значимость и обеспечивать положительный эффект за счет изучения их поведения и прогнозирования состояния в будущем. Это обеспечивает поддержку в принятии организационно-технологических решений для повышения эффективности рассматриваемых объектов.

Таким образом, для одного машиностроительного предприятия можно построить множество ЦД различных объектов, входящих в его состав. Примеры объектов, для которых

может стать актуальным построение их ЦД в контексте машиностроительного предприятия, приведены на рис. 2. Информационные системы, обслуживающие деятельность машиностроительного предприятия, содержат данные для наполнения информационных моделей ЦД, необходимых для анализа и моделирования их работы.

Следует отметить, что далеко не всегда данные для построения ЦД содержатся в оцифрованном виде, хранятся в информационных системах и являются достаточными и непротиворечивыми. В этом случае создание информационной модели подразумевает не только сбор и агрегирование данных в необходимую структуру, но и их анализ и предобработку.

В предложенной обобщенной архитектуре принято допущение, что данных для создания информационной модели ЦД достаточно, и они содержатся в соответствующих информационных системах.

Наиболее распространенным объектом, для которого строится ЦД, является продукт (изделие). Построению ЦД продукта посвящено много работ российских и зарубежных специалистов [1–6]. ЦД продукта может проходить через весь его жизненный цикл, включающий в себя стадии проектирования, прототипиро-

вания, производства, обслуживания и утилизации.

На стадии проектирования продукта ЦД позволяет моделировать его работу на основе проектных данных, благодаря чему обеспечивает поддержку в принятии проектных решений (ПР). На этапе производства продукта ЦД дает возможность отслеживать основные этапы его изготовления. На этапе эксплуатации серийно выпускаемого продукта ЦД обеспечивает сбор данных о состоянии каждого его экземпляра, предоставляя информацию конечным пользователям и разработчикам, тем самым накапливая статистические данные по параметрам работы и неисправностям объекта.

Накопленные данные могут быть сохранены и применены для анализа, разработки и внесения корректировок с целью улучшения эксплуатационных характеристик новых экземпляров продуктов. После утилизации продукта данные о его производстве и эксплуатации можно сохранить и использовать при создании новых модификаций продукта [1, 6].

Также на рис. 2 приведен пример построения ЦД СБ предприятия как независимой системы, которую необходимо развивать и поддерживать в работоспособном состоянии. С помощью ЦД СБ можно моделировать сце-

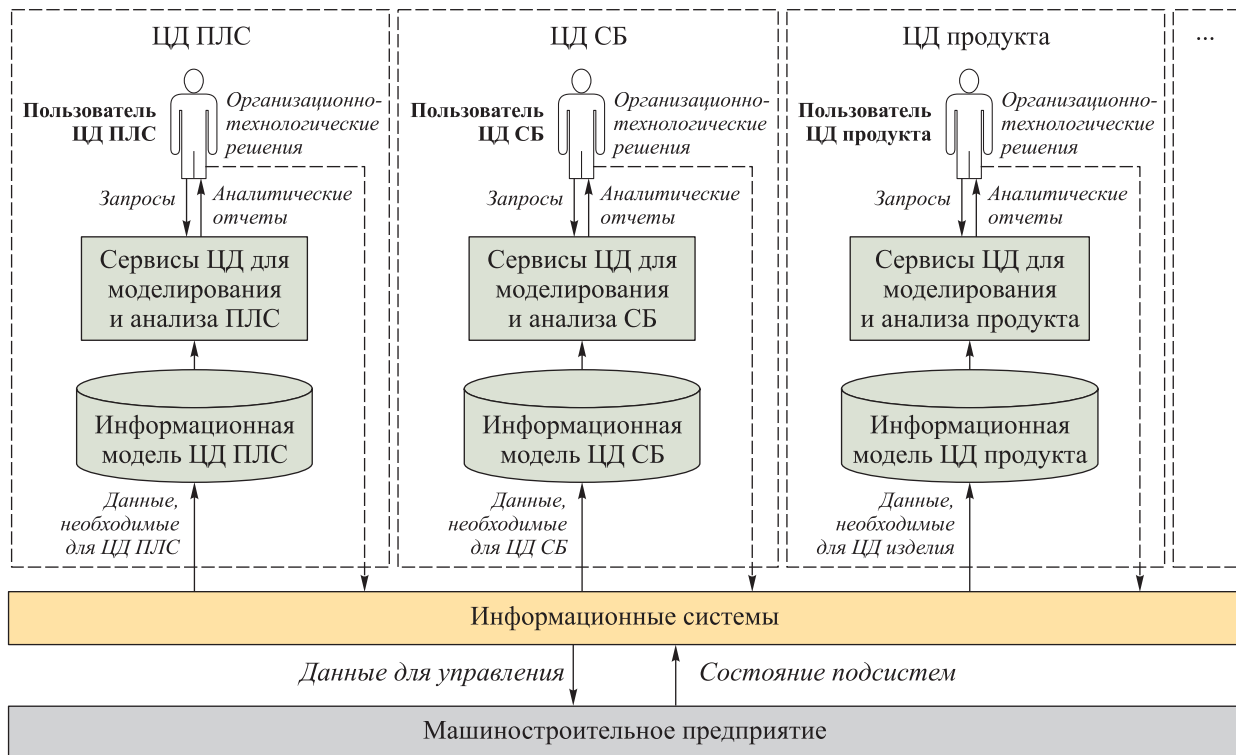


Рис. 2. Схема построения ЦД различных объектов в контексте машиностроительного предприятия

нарии «что будет, если?» с точки зрения возникновения нарушений безопасности, оценивать эффективность СБ и принимать организационные решения.

ПЛС машиностроительного предприятия представляет собой особый вид организационно-технической системы, состоящей из средств и предметов производства, производственных процессов и комплексов управления, совместное функционирование которых позволяет изготавливать изделия [4]. ПЛС — сложная система. Построение ЦД ПЛС обеспечит поддержку принятия организационно-технологических решений для повышения эффективности ее функционирования.

Пользователями ЦД ПЛС могут являться руководители предприятия среднего звена, такие как начальник производства, специалисты технологических и инженерных служб и др.

Помимо приведенных примеров в рамках машиностроительных предприятий можно рассматривать ЦД отдельных единиц технологического оборудования, технологических процессов и других объектов.

Обобщенная архитектура ЦД различных объектов машиностроительного предприятия обладает единым набором основных компонентов: информационной моделью и сервисами построения ЦД (см. рис. 2). Данные и структура информационной модели ЦД, а также конкретный набор сервисов обработки данных и моделирования будут существенно различаться в зависимости от рассматриваемого объекта, а также от поставленных целей и задач ЦД. Построение ЦД для одного и того же объекта можно выполнить с разным уровнем детализа-

ции, что зависит от поставленных целей и задач его создания.

Построение и использование ЦД ПЛС на различных стадиях ее жизненного цикла. Жизненный цикл любой ПЛС включает в себя следующие основные стадии: проектирование, строительство, эксплуатация и утилизация. ЦД ПЛС можно сформировать и использовать на стадиях проектирования и эксплуатации, а также частично на этапе утилизации.

При этом на разных стадиях жизненного цикла ПЛС ее ЦД используют для решения различных задач. Типовая архитектура ЦД на различных стадиях жизненного цикла ПЛС показана на рис. 3.

На стадии проектирования ПЛС определяют ее основные задачи, разрабатывают базовые ПР, необходимые для ее построения и изготовления запланированной продукции. Стадию проектирования можно подразделить на два этапа: разработку и валидацию ПР.

На этапе разработки ПР создают и выпускают версию проектной документации. ЦД не реализован, так как для его создания необходимо завершить этап базового проектирования и получить исходные данные, описывающие проект ПЛС. При этом может осуществляться постепенное наполнение информационной модели для создания прототипа ЦД [7, 10].

На этапе валидации ПР, подразумеваемом наличие законченной стадии проекта ПЛС, осуществляется его проверка с применением различных подходов (расчетных методов, математического моделирования и др.). На основе данных проекта ПЛС создается прототип ЦД,

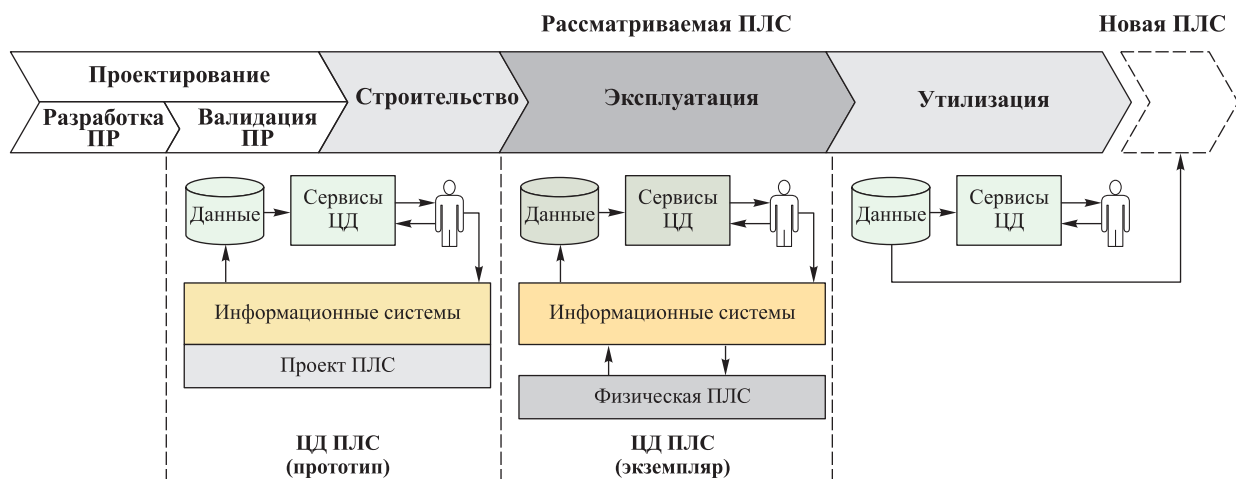


Рис. 3. Типовая архитектура ЦД ПЛС на различных стадиях ее жизненного цикла

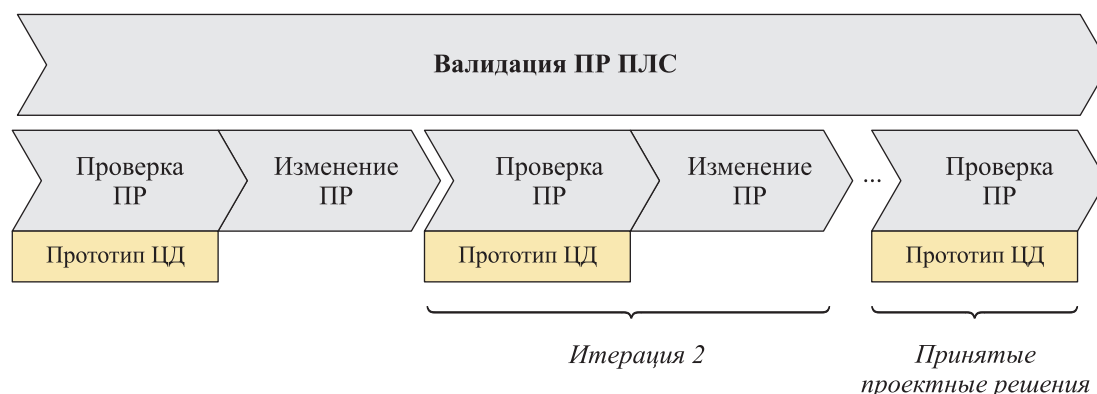


Рис. 4. Схема итеративного подхода к валидации ПР ПЛС

позволяющий моделировать ее работу, причем реальная (физическая) ПЛС еще отсутствует.

Информационная модель ЦД ПЛС на этапе валидации включает в себя номенклатуру изделий, производственные мощности (в том числе параметры их работы), технологические маршруты производства, параметры транспортной системы, программу выпуска изделий и др. Конечный перечень данных и уровень их детализации зависят от конкретной ПЛС, ее типа и поставленной задачи построения ЦД.

Основным источником информации для построения прототипа ЦД служат системы проектирования ПЛС. В качестве сервисов ЦД выступают расчетные системы, позволяющие анализировать данные ПЛС, системы имитационного моделирования и визуализации данных пользователю. По результатам проведенного моделирования работы ПЛС в ПР могут вноситься изменения и исправления.

Таким образом, на этом этапе жизненного цикла ПЛС реализуется итеративный подход: проверка текущих ПР, внесение необходимых изменений в проект, новая проверка и т. д. до

тех пор, пока виртуальная модель ПЛС не будет отвечать всем необходимым требованиям (рис. 4). В итоге благодаря созданию прототипа ЦД на стадии проектирования ПЛС качественно повышается уровень проверки ПР и статус этапа валидации [4, 15].

На стадии строительства физической ПЛС в ее проект часто вносят изменения и корректировки. Последние являются вынужденными и обусловлены необходимостью корректировки ПР, вызванной, например, недоступностью на рынке выбранных ранее моделей оборудования, что приводит к изменению проекта ПЛС в части планировочных решений. Прототип ЦД должен учитывать вносимые изменения и соответствовать последней версии проекта, который на этой стадии жизненного цикла воплощается в реальную ПЛС.

Выделим перечень вероятных изменений проекта ПЛС, решение о которых можно принять с использованием ее прототипа ЦД, функционирующего на стадиях ее проектирования и строительства. Изменения могут затрагивать следующие организационно-технологические

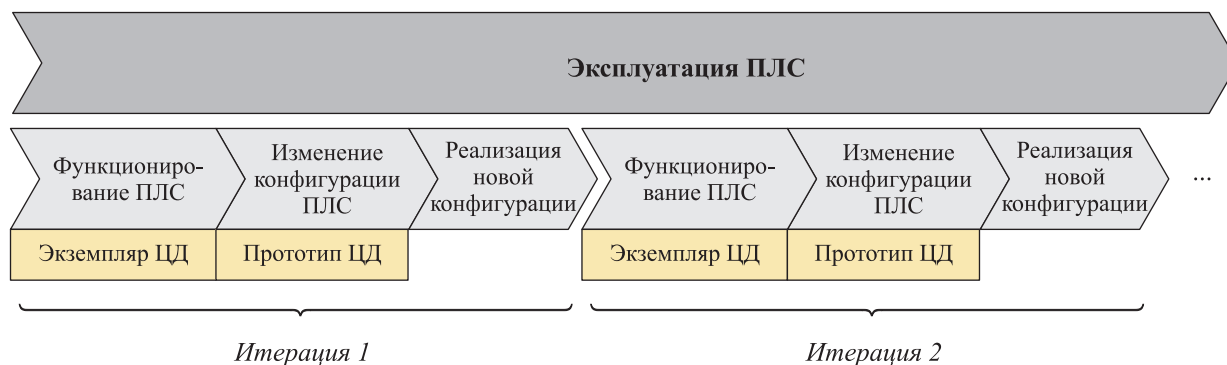


Рис. 5. Схема изменения конфигурации ПЛС на стадии эксплуатации

решения: схемы кооперации, технологический метод изготовления изделий, структуру и степень автоматизации технологических процессов, состав рабочих мест, оборудования и технологической оснастки, технологические режимы, алгоритмы планирования и др.

На стадии эксплуатации ПЛС ЦД получает связь с физической ПЛС путем передачи данных из информационных систем, обслуживающих ее. Таким образом, ЦД отражает работу физической ПЛС и позволяет прогнозировать ее состояние. В ходе эксплуатации ПЛС данные, содержащиеся в информационной модели ЦД, постоянно дополняются, так как на этой стадии ЦД должен учитывать информацию о текущем состоянии элементов ПЛС. Это дает возможность накапливать статистические данные о работе элементов ПЛС, которые будут учтены при моделировании ее работы, благодаря чему повышается адекватность прогнозирования работы ПЛС.

На стадии эксплуатации ПЛС построение ЦД призвано обеспечить поддержку в приня-

тии решений по управлению ПЛС, а именно: системы технического обслуживания и ремонта, системы материально-технического снабжения, алгоритмов разработки производственных расписаний, графиков работы цехов и участков, кадрового состава и др.

Принятие организационно-технологических решений по изменению ПЛС в части ее управления на основе экземпляра ЦД осуществляется на базе результатов расчета и анализа показателей ее эффективности. К этим показателям относятся: время выполнения производственной программы, коэффициенты загрузки оборудования, качества и брака, общая эффективность оборудования и др. Указанные показатели с использованием ЦД могут рассчитываться как для текущего состояния ПЛС, так и для прогнозируемого.

Следует отметить, что на стадии эксплуатации ПЛС также может подвергаться изменению конфигурации (рис. 5), например, преобразованию производственных мощностей, обусловленному изменением номенклатуры, производ-

Таблица 1

Особенности построения ЦД ПЛС на различных стадиях ее жизненного цикла

Стадия жизненного цикла ПЛС		Реальная ПЛС	ЦД	
Название	Описание		Возможность создания (тип)	Особенности
Проектирование: разработка ПР	Разработка базовых ПР ПЛС	–	–	ЦД не реализован. Для создания ЦД ПЛС необходимо выполнить этап базового проектирования
Проектирование: валидация ПР	Проверка разработанных ПР и внесение корректировок на основе прототипа ЦД	–	+	ЦД отражает актуальные ПР, позволяет проверить ПР и обеспечивает поддержку по их изменению. Нет связи с реальной ПЛС
Строительство	Процесс реализации ПЛС — строительство завода (подразделения), обеспечение необходимой инфраструктуры	–/+	+	ЦД соответствует последним принятым ПР и актуализируется, если в ходе строительства в ПЛС вносятся коррективы
Эксплуатация	ПЛС введен в эксплуатацию и функционирует. В ходе эксплуатации могут происходить изменения конфигурации	+	+	ЦД получает связь с реальной ПЛС. Формируются рекомендации по изменению ПЛС. При изменении конфигурации ПЛС поддерживается в актуальном состоянии
Утилизация	Процесс вывода ПЛС из эксплуатации и утилизация	+/-	+/-	Накопленные данные ЦД могут быть сохранены и использованы при создании новых ПЛС

ственной программы выпуска изделий и др. Принятие решений об изменении конфигурации ПЛС может быть сформировано на основе анализа результатов моделирования работы ПЛС в ее экземпляре ЦД, или вызвано внешними факторами.

При проектировании новой конфигурации ПЛС ее ЦД (или его фрагмент) снова переходит в статус прототипа, на базе которого выполняется валидация уже измененной конфигурации (см. рис. 5). Затем реализуется новая конфигурация ПЛС (закупка и ввод в эксплуатацию новых единиц оборудования, внедрение новых алгоритмов планирования и др.), и ЦД снова переходит в состояние экземпляра ПЛС до следующего ее изменения.

Таким образом, на стадии эксплуатации ПЛС также можно говорить об итеративном подходе к формированию и изменению ЦД ПЛС [4, 16, 17].

На стадии утилизации ПЛС нет необходимости отражать в ее ЦД все процессы, происходящие с ПЛС. Однако данные, накопленные за время эксплуатации ПЛС (или их отдельные

фрагменты), могут быть востребованы в дальнейшем при построении новых ПЛС. Такие данные могут содержать наработанную статистику по работе оборудования, технологические циклы, информацию о выполнении производственной программы и др.

Таким образом, при проектировании новых ПЛС могут использоваться фрагменты ЦД других ПЛС, включая те, которые уже выведены из эксплуатации. Это является особенно актуальным для производственных предприятий, имеющих вертикально интегрированную организационную структуру.

Основные стадии жизненного цикла ПЛС и особенности построения ее ЦД на каждой из них показаны в табл. 1, где знак «+» означает наличие объекта (ПЛС или ее ЦД) на указанной стадии жизненного цикла, знак «-» — его отсутствие.

Одной из важных задач при построении ЦД ПЛС является агрегация необходимых данных, содержащихся в информационной среде предприятия (информационные системы, документы и другие источники данных), в информаци-

Таблица 2

Классы информационных систем предприятия, необходимые для построения ЦД ПЛС на различных стадиях ее жизненного цикла

Класс информационных систем предприятия	Прототип ЦД ПЛС		Экземпляр ЦД ПЛС	
	Применение	Особенности	Применение	Особенности
Системы проектирования и технологической подготовки производства	+	Основной источник данных на данном этапе для моделирования прототипа ПЛС	+/-	При постоянной номенклатуре и производственной программе используют ограниченно в рамках существующей конфигурации ПЛС
Системы управления ресурсами предприятия	+/-	Может применяться ограниченно для хранения данных о проектируемой ПЛС	+	Основной источник данных о продуктах, процессах и ресурсах ПЛС
Системы управления производственными процессами	-	-	+	Источник данных об алгоритмах управления ПЛС
Системы мониторинга и диспетчеризации производственных процессов и оборудования	-	-	+	Источник данных о состоянии оборудования, фактическом времени выполнении операций, статистике отказов оборудования, возникновении несоответствующей продукции, фактически изготовленной продукции

онную модель, необходимую и достаточную для решения конкретных задач ЦД ПЛС.

Основные классы информационных систем машиностроительного предприятия, являющиеся источниками данных для построения прототипа и экземпляра ЦД на соответствующих стадиях жизненного цикла ПЛС [4, 10, 18], приведены в табл. 2.

Выводы

1. С развитием информационных технологий идея построения ЦД объектов становится все более достижимой и уже реализована на практике. ЦД продуктов, процессов и систем позволяют вывести исследование поведения объектов на качественно новый уровень за счет реализации постоянной связи с объектом (или его прототипом), мониторинга его состо-

яния и моделирования его состояния в будущем. При этом построение ЦД объектов всегда должно быть направлено на решение конкретных задач.

2. Разработку и сопровождение ЦД любых объектов проводят на базе их информационной модели, содержащей логически связанные данные о работе объекта и сервисов, осуществляющих обработку данных и моделирование поведения объекта.

3. В контексте машиностроительных предприятий можно выделить ПЛС как объект построения ЦД, с помощью которого можно валидировать ПР и моделировать поведение ПЛС в ходе выполнения производственной программы, что обеспечивает поддержку принятия организационно-технологических решений для повышения эффективности ПЛС.

Литература

- [1] Grieves M. *Origins of the digital twin concept*, doi: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>
- [2] Царев М.В., Андреев Ю.С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования. *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*, 2021, т. 64, № 7, с. 517–531, doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531>
- [3] Cheng J., Zhang H., Tao F. et al. DT-II: Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2020, vol. 62, art. 101881, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101881>
- [4] Боровков А.И., Рябов Ю.А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки. *Сб. тр. науч.-практ. конф. Цифровая трансформация экономики и промышленности*. Санкт-Петербург, СПбПУ, 2019, с. 234–245.
- [5] Григорьев С.Н., Долгов В.А., Никишечкин П.А. др. Разработка структурной модели цифрового двойника производственно-логистической системы машиностроительных предприятий. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 2, с. 43–58, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-43-58>
- [6] Cimino C., Negri E., Fumagalli L. Review of digital twin applications in manufacturing. *Comput. Ind.*, 2019, vol. 113, art. 103130, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>
- [7] Григорьев С.Н., Долгов В.А., Никишечкин П.А. и др. Имитационное моделирование производственных процессов различных типов машиностроительных производств. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 3, с. 84–99, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-3-84-99>
- [8] Никишечкин П.А., Ивашин С.С., Черненко В.Е. и др. Система имитационного моделирования PlantTwin как инструмент верификации производственных планов и поддержки принятия решений для повышения эффективности машиностроительных производств. *Вестник машиностроения*, 2021, № 3, с. 80–85, doi: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-3-80-85>
- [9] Davis J., Edgar T., Porter J. et al. Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance. *Comput. Chem. Eng.*, 2012, vol. 47, pp. 145–156, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.06.037>

- [10] Григорьев С.Н., Долгов В.А., Подкидышев А.А. и др. Управление загрузкой рабочих мест при изменении номенклатуры и программы выпуска деталей в дискретном производстве. *Вестник машиностроения*, 2022, № 7, с. 85–88.
- [11] Nikishechkin P.A., Chervonnova N.Y., Nikich A.N. An approach of developing solution for monitoring the status and parameters of technological equipment for the implementation of Industry 4.0. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 709, no. 4, art. 044065, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044065>
- [12] Grigoriev S.N., Martinov G.M. An ARM-based multi-channel CNC solution for multi-tasking turning and milling machines. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 525–528, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.036>
- [13] Hao Z., Qiang L., Xin C. et al. A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 26901–26911, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2766453>
- [14] Grigoriev S.N., Martinov G.M. Scalable open cross-platform kernel of PCNC system for multi-axis machine tool. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 238–243, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.043>
- [15] Tao F., Liu A., Hu T. et al. *Digital twin driven smart design*. Elsevier, 2020. 358 p.
- [16] Grigoriev S.N., Masterenko D.A., Teleshevskii V.I. et al. Contemporary state and outlook for development of metrological assurance in the machine-building industry. *Meas. Tech.*, 2013, vol. 55, no. 11, pp. 1311–1315, doi: <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0126-0>
- [17] Grigoriev S.N., Sinopalnikov V.A., Tereshin M.V. et al. Control of parameters of the cutting process on the basis of diagnostics of the machine tool and workpiece. *Meas. Tech.*, 2012, vol. 55, no. 5, pp. 555–558, doi: <https://doi.org/10.1007/s11018-012-9999-6>
- [18] Grigoriev S.N., Gurin V.D., Volosova M.A. et al. Development of residual cutting tool life prediction algorithm by processing on CNC machine tool. *Materwiss. Werksttech.*, 2013, vol. 44, no. 9, pp. 790–796, doi: <https://doi.org/10.1002/mawe.201300068>

References

- [1] Grieves M. *Origins of the digital twin concept*, doi: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>
- [2] Tsarev M.V., Andreev Yu.S. Digital twins: definition, approaches and methods of development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2021, vol. 64, no. 7, pp. 517–531, doi: <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531> (in Russ.).
- [3] Cheng J., Zhang H., Tao F. et al. DT-II: Digital twin enhanced Industrial Internet reference framework towards smart manufacturing. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2020, vol. 62, art. 101881, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101881>
- [4] Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. [Digital twins in industry: development history, classification, technologies, use cases]. *Sb. tr. nauch.-prakt. konf. Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki i promyshlennosti* [Proc. Sci.-Pract. Conf. Digital Transformation of Economy and Industry]. Sankt-Petersburg, SPbPU Publ., 2019, pp. 234–245. (In Russ.).
- [5] Grigoryev S.N., Dolgov V.A., Nikishechkin P.A. et al. Development of a structural model of a digital twin of machine-building enterprises production and logistics system. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan. Eng.], 2021, no. 2, pp. 43–58, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-43-58> (in Russ.).
- [6] Cimino C., Negri E., Fumagalli L. Review of digital twin applications in manufacturing. *Comput. Ind.*, 2019, vol. 113, art. 103130, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103130>
- [7] Grigoryev S.N., Dolgov V.A., Nikishechkin P.A. et al. Simulation modeling production processes of various types of machine-building enterprises. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mechan.

- Eng.], 2022, no. 3, pp. 84–99, doi: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-3-84-99> (in Russ.).
- [8] Nikishechkin P.A., Ivashin S.S., Chernenko V.E. et al. PlantTwin simulation system as a tool for verifying production plans and supporting the decision-making to improve production effectiveness. *Vestnik mashinostroeniya*, 2021, no. 3, pp. 80–85, doi: <https://doi.org/10.36652/0042-4633-2021-3-80-85> (in Russ.).
- [9] Davis J., Edgar T., Porter J. et al. Smart manufacturing, manufacturing intelligence and demand-dynamic performance. *Comput. Chem. Eng.*, 2012, vol. 47, pp. 145–156, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.06.037>
- [10] Grigoryev S.N., Dolgov V.A., Podkidyshev A.A. et al. Managing the workplaces capacity when changing the nomenclature and manufacturing program of parts in discrete production. *Vestnik mashinostroeniya*, 2022, no. 7, pp. 85–88. (In Russ.).
- [11] Nikishechkin P.A., Chervonnova N.Y., Nikich A.N. An approach of developing solution for monitoring the status and parameters of technological equipment for the implementation of Industry 4.0. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2020, vol. 709, no. 4, art. 044065, doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/709/4/044065>
- [12] Grigoriev S.N., Martinov G.M. An ARM-based multi-channel CNC solution for multi-tasking turning and milling machines. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 46, pp. 525–528, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.036>
- [13] Hao Z., Qiang L., Xin C. et al. A digital twin-based approach for designing and multi-objective optimization of hollow glass production line. *IEEE Access*, 2017, vol. 5, pp. 26901–26911, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2766453>
- [14] Grigoriev S.N., Martinov G.M. Scalable open cross-platform kernel of PCNC system for multi-axis machine tool. *Procedia CIRP*, 2012, vol. 1, pp. 238–243, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.04.043>
- [15] Tao F., Liu A., Hu T. et al. *Digital twin driven smart design*. Elsevier, 2020. 358 p.
- [16] Grigoriev S.N., Masterenko D.A., Teleshevskii V.I. et al. Contemporary state and outlook for development of metrological assurance in the machine-building industry. *Meas. Tech.*, 2013, vol. 55, no. 11, pp. 1311–1315, doi: <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0126-0>
- [17] Grigoriev S.N., Sinopalnikov V.A., Tereshin M.V. et al. Control of parameters of the cutting process on the basis of diagnostics of the machine tool and workpiece. *Meas. Tech.*, 2012, vol. 55, no. 5, pp. 555–558, doi: <https://doi.org/10.1007/s11018-012-9999-6>
- [18] Grigoriev S.N., Gurin V.D., Volosova M.A. et al. Development of residual cutting tool life prediction algorithm by processing on CNC machine tool. *Materwiss. Werksttech.*, 2013, vol. 44, no. 9, pp. 790–796, doi: <https://doi.org/10.1002/mawe.201300068>

Статья поступила в редакцию 13.01.2023

Информация об авторах

НИКИШЕЧКИН Петр Анатольевич — кандидат технических наук, старший научный сотрудник кафедры «Высокоэффективные технологии обработки». ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (127055, Москва, Российская Федерация, Вадковский пер., д. 1, e-mail: pnikishechkin@gmail.com).

ДОЛГОВ Виталий Анатольевич — доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник кафедры «Высокоэффективные технологии обработки». ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (127055, Москва, Российская Федерация, Вадковский пер., д. 1, e-mail: v-dolgov@yandex.ru).

Information about the authors

NIKISHECHKIN Petr Anatolievich — Candidate of Science (Eng.), Senior Researcher, Department of High-Efficiency Machining Technologies. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Moscow State University of Technology STANKIN (127055, Moscow, Russian Federation, Vadkovskiy per., Bldg. 1, e-mail: pnikishechkin@gmail.com).

DOLGOV Vitaliy Anatolievich — Doctor of Science (Eng.), Chief Researcher, Department of High-Efficiency Machining Technologies. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Moscow State University of Technology STANKIN (127055, Moscow, Russian Federation, Vadkovskiy per., Bldg. 1, e-mail: v-dolgov@yandex.ru).

ГРИГОРЬЕВ Сергей Николаевич — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высокоэффективные технологии обработки». ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (127055, Москва, Российская Федерация, Вадковский пер., д. 1, e-mail: s.grigoriev@stankin.ru).

GRIGORIEV Sergey Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department, High-Efficiency Machining Technologies. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education — Moscow State University of Technology STANKIN (127055, Moscow, Russian Federation, Vadkovskiy per., Bldg. 1, e-mail: s.grigoriev@stankin.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Никищечкин П.А., Долгов В.А., Григорьев С.Н. Разработка типовых архитектур цифровых двойников производственно-логистических систем машиностроительных предприятий на разных стадиях их жизненного цикла. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 5, с. 37–48, doi: 10.18698/0536-1044-2023-5-37-48

Please cite this article in English as:

Nikishechkin P.A., Dolgov V.A., Grigoriev S.N. Development of the digital twins' typical architecture in the mechanical engineering enterprise production and logistics systems at different stages of their lifecycle. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 5, pp. 37–48, doi: 10.18698/0536-1044-2023-5-37-48



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию
под редакцией Н.Г. Багдасарьян**

**«Социально-технологический дискурс
в теориях и практиках цифрового тренда»**

В монографии содержится анализ состояния и тенденций развития технологий цифрового общества, оказывающих прямое или косвенное воздействие на цивилизацию XXI века и с большой вероятностью на отдаленное будущее. В трех частях, объединенных общим вектором цифровой инженерии, рассматриваются вопросы природы техники как вида социальной реальности, особой практики и деятельности, проблемы становления и функционирования технической среды в аспекте методологических подходов и этических проблем, влияние цифровизации на образовательные практики и цифровое поведение личности. Представлены культурологические аспекты цифровизации социальных практик.

Для специалистов, занимающихся проблемами философии, социологии и культурологии техники и инженерной деятельности, социокультурного развития в контексте цифровых технологий, а также для студентов и аспирантов, широкой публики, интересующейся перспективами цивилизационной эволюции.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://bmstu.press>