

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЛОГИСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

С.Н. Григорьев¹

s.grigoriev@stankin.ru

В.А. Долгов²

dolgov@digitalfabrika.ru

П.А. Никишечкин^{1,2}

npa@digitalfabrika.ru

Н.В. Долгов²

dnv@digitalfabrika.ru

¹ ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», Москва, Российская Федерация

² ООО «Фабрика Цифровых Систем», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены теоретические аспекты создания цифровых двойников объектов и процессов. Исследованы актуальные тенденции развития современных машиностроительных предприятий и сформулированы цели и задачи разработки цифрового двойника производственно-логистической системы машиностроительного предприятия. Выявлено, что решение задач анализа, оценки и прогнозирования состояния производственно-логистической системы основано на разработке с заданной степенью адекватности информационной модели, описывающей аспекты функционирования ее основных подсистем в соответствии с целями и задачами, решаемыми цифровым двойником. Создание подобной информационной модели невозможно без наличия целостных и логически связанных исходных данных о производственно-логистической системе, источниками которых могут являться информационные системы предприятия, осуществляющие согласованное управление производственными и организационно-экономическими процессами на различных уровнях управления машиностроительным предприятием. В соответствии с этим предложена структурная модель цифрового двойника и разработана структура данных информационной модели производственно-логистической системы. Сформированы требования к составу и взаимодействию информационных систем предприятия, содержащих и обрабатывающих данные для построения цифрового двойника производственно-логистической системы. Предложен об-

Ключевые слова

Цифровой двойник, производственно-логистическая система, машиностроительное предприятие, информационная модель, концепция «Индустрия 4.0»

общенный подход к информационному обеспечению задач, решаемых цифровым двойником, заключающийся в формировании локальных информационных моделей, содержащих актуальные данные о производственно-логистической системе машиностроительного предприятия

Поступила 02.07.2020

Принята 17.08.2020

© Автор(ы), 2021

Введение. Развитие информационных технологий в последние годы неразрывно связано с появлением новых тенденций и подходов к проектированию и организации производства. Важным переходным периодом стало появление концепции «Индустрия 4.0», основная идея которой заключается в цифровизации производства, повышении уровня автоматизации и изменении роли человека в производстве [1]. Разработка и производство в кратчайшие сроки конкурентоспособной продукции нового поколения возможны сегодня с применением фабрик будущего (Factories of the Future) — систем комплексных технологических решений, ключевыми элементами которых становятся умные системы и цифровые двойники (Digital Twins) объектов/изделий/продуктов, производственных систем и технологических/производственных процессов [2–5].

Понятие «цифровой двойник» имеет множество трактовок и определений. Под цифровым двойником обычно подразумевается виртуальная модель реального физического объекта или процесса, которая представляет собой сложную математическую модель, позволяющую с высокой точностью описывать поведение реального физического объекта или системы, а также технологического/производственного процесса или сервисов. С помощью подобных моделей значительно расширяются возможности диагностирования и прогнозирования работы сложных систем [3, 6]. Таким образом, за счет применения цифрового двойника становится возможным сосредоточить основную долю изменений и затрат на стадии проектирования, что позволяет сократить издержки, возникающие на остальных этапах жизненного цикла.

Построение цифрового двойника не ограничивается только сбором данных с реального объекта и описанием его текущего состояния. Подобный набор данных определяет понятие «цифровая тень объекта», которая представляет собой набор больших данных (Big Data) с учетом связей и зависимостей, описывающих его состояние, как правило, в нормальных условиях работы. Можно полагать, что без цифровой тени объекта невозможно построить и его цифровой двойник. Однако цифровой двойник должен иметь и необходимый набор законов и правил, описывающих поведение объекта и позволяющих моделировать его различные

состояния. Цифровой двойник также должен уметь определять и отделять содержательные данные, очищенные от мусора и шума, в то время как цифровая тень хранит все считываемые параметры объекта или системы [3, 7, 8].

Построение цифровых двойников является сложным процессом, требующим точного воссоздания поведения объекта или системы, что является невозможным в абсолютном виде. Степень приближенности модели к реальному объекту формирует понятие адекватности цифрового двойника, которая может определяться числом учитываемых параметров объекта, описанной логики и законов поведения объекта [4, 9]. Таким образом, даже простое описание объекта, например чертеж или 3D-модель изделия, уже является в некотором роде его цифровым двойником, но с низким уровнем адекватности. При этом уровень адекватности всегда будет ограничен, поскольку невозможно в полной мере описать какой-либо объект, так как существует бесконечное множество его параметров. Однако можно задать ограниченный набор параметров объекта, который будет необходимым и достаточным для решения конкретной задачи.

В виду сложности реального машиностроительного предприятия, включающего в себя подсистемы различной природы (экономические, правовые, технологические, конструктивные, эксплуатационные, эргономические, социальные, психологические, биологические и др.), можно говорить только о создании фрагмента цифрового двойника, основанного на информационной модели, состоящей из ограниченного набора данных, фактов, понятий или инструкций, и предназначенного для решения конкретной задачи [10, 11]. Таким образом, в зависимости от требований, предъявляемых к цифровым двойникам, одно и то же машиностроительное предприятие может иметь несколько цифровых двойников, которые содержат соответствующие информационные модели, описывающие различные параметры и свойства объекта и отличающиеся уровнем адекватности в соответствии с заданными требованиями [5].

Главной функцией машиностроительного предприятия является изготовление изделий заданной номенклатуры. Эта функция реализуется в производственно-логистической системе (ПЛС) предприятия и включает в себя следующие основные типы логистических операций: управление материальным потоком и преобразование материального потока. Построение цифрового двойника ПЛС с требуемым уровнем адекватности позволит полноценно оценивать ее возможности, текущее состояние, моделировать различные ситуации и сценарии функционирования [2].

Создание цифрового двойника ПЛС машиностроительного предприятия основывается на разработке с заданной степенью адекватности информационной модели, описывающей аспекты функционирования ее основных подсистем в соответствии с целями и задачами, решаемыми цифровым двойником.

Построение цифрового двойника ПЛС машиностроительных предприятий. Согласно приведенным подходам к построению цифровых двойников [2, 3, 12], предложены основная цель создания цифрового двойника ПЛС машиностроительного предприятия и решаемые им задачи, в соответствии с которыми определяются граничные условия и степень детализации объектов производственной системы и реализуемых в ней процессов.

Основной целью создания цифрового двойника ПЛС машиностроительного предприятия является разработка современного эффективного инструмента для расчета параметров производственных процессов, анализа организационно-технологических возможностей производственной системы, формирования решений для выполнения производственной программы и повышения эффективности производственных процессов, а также управления ими с учетом текущей производственной ситуации [13, 14]. Таким образом, одним из важнейших назначений цифрового двойника является обеспечение комплексного решения задач инжиниринга и операционной деятельности. Состав задач, возлагаемых на цифрового двойника ПЛС, с развитием его роли в комплексном решении инжиниринговых и операционных задач будет изменяться, однако уже сегодня можно выделить ряд групп первоочередных задач, которые должен решать цифровой двойник ПЛС (табл. 1).

В отличие от систем управления жизненным циклом изделий цифровой двойник ПЛС позиционируют как инструмент решения задач инжиниринга и управления ПЛС.

Цифровой двойник ПЛС может быть реализован путем создания информационной модели, взаимодействующей с информационными системами предприятия с использованием интерфейсов программирования приложений и других открытых протоколов взаимодействия, позволяющих осуществлять сбор и агрегирование необходимых актуальных данных о работе ПЛС в целях синхронного представления состояния, условий работы и ее конфигурации. Информационная модель должна включать в себя ограниченный набор взаимосвязанных данных, фактов, понятий или инструкций, необходимый и достаточный для решения задач в области управления и преобразования материального потока [5, 15–18].

Таблица 1

Основные группы задач, решаемых цифровым двойником ПЛС

Задачи инженеринговой деятельности	Комплексное решение задач	Задачи операционной деятельности
<p>Конструкторская и технологическая подготовка производства</p>	<p>Балансировка загрузки рабочих мест. Расчет производственных мощностей, необходимых для выполнения портфеля заказов. Моделирование выполнения производственной программы. Анализ результатов моделирования</p>	<p>Разработка производственных расписаний. Формирование управляющих воздействий на ПЛС машиностроительного предприятия</p>
	<p>Разработка управляющих решений для сокращения производственных циклов и стоимости изготовления изделий. Оценка рисков в ходе формирования и выполнения программы выпуска. Управление системой ремонта и технического обслуживания инженерного и технологического оборудования. Управление схемой кооперации и цепочками поставок</p>	<p>Мониторинг и диспетчеризация производственных процессов и состояния оборудования</p>

В общем виде ПЛС можно описать двумя основными функциями: управление материальным потоком и преобразование материального потока. Структура данных информационной модели ПЛС машиностроительного предприятия включает в себя два основных блока данных:

1) блок данных для формирования управляющих воздействий, предназначен для информационной поддержки процессов управления материальным потоком;

2) блок данных, определяющий материальный поток, а также правила и ресурсы для его преобразования.

Материальный поток можно описать с помощью следующих основных элементов: продукты, процессы и ресурсы. Продукт — это любой материальный объект, состояние которого изменяется в процессе производства, и который является результатом процесса производства (материал, заготовка, деталь, изделие). К процессам относятся производственные процессы, включая технологические, транспортные, контроль качества и испытания, процессы технического обслуживания и ремонта и др. К ресурсам можно отнести все производственные мощности предприятия (оборудование, технологическую оснастку, производственную инфраструктуру, человеческие ресурсы, транспортное и складское оборудование, информационную инфраструктуру и др.) [6, 19–21].

Набор данных, необходимых для систем анализа, оценки и моделирования зачастую формируется однократно с определенным интервалом времени. Это происходит из-за сложности сбора информации из различных информационных систем и приведения их в необходимый формат. В таком случае формируется описание одномоментного состояния ПЛС, в котором не учитываются происходящие в реальном времени изменения расписания, состава и состояния ресурсов и т. д. Для решения проблемы, связанной с информационным обеспечением систем оценки и анализа, предлагается сформировать локальные информационные модели, содержащие только данные, необходимые для решения определенной задачи или группы задач. Такие локальные информационные модели создаются каждый раз для выполнения соответствующих задач на основании запросов от систем оценки, анализа и моделирования путем агрегирования информации из различных систем в соответствии с заданными ссылками, которые содержатся в информационной модели ПЛС [22].

Обобщенный вид структуры данных информационной модели ПЛС машиностроительного предприятия, необходимых для решения предложенных задач (см. табл. 1), а также источники получения этих данных приведены в табл. 2.

Таблица 2

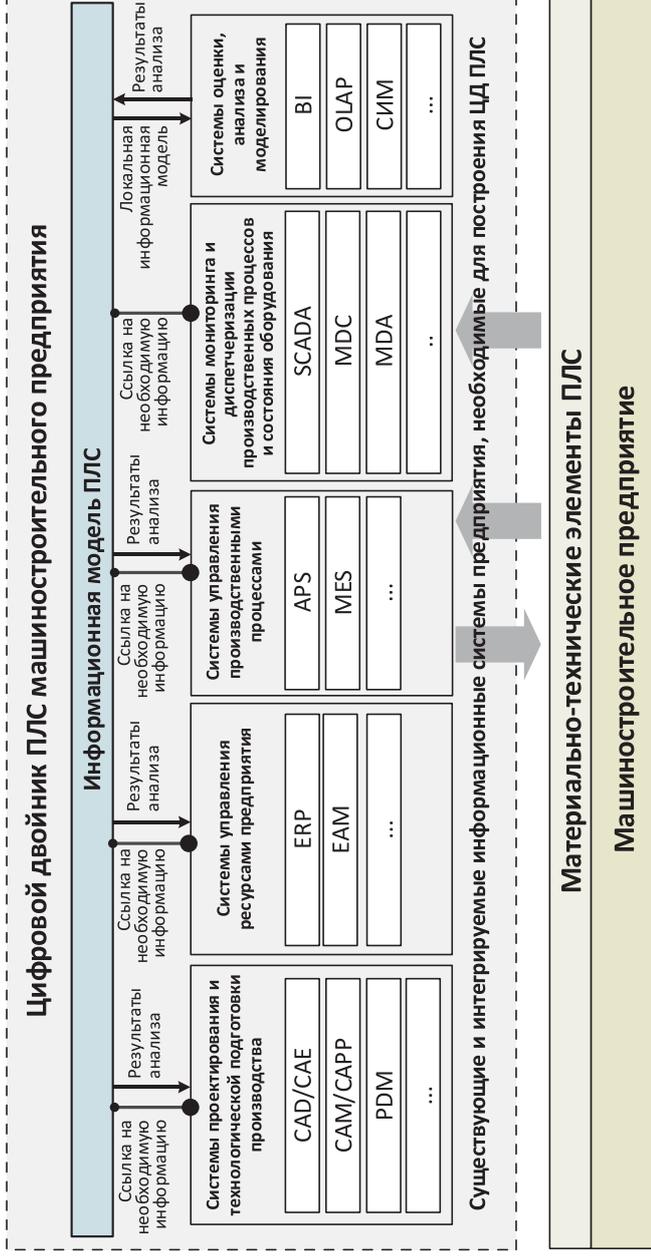
Структура данных информационной модели ПЛС машиностроительного предприятия

Структурные элементы информационной модели	Блок данных для формирования управляющих воздействий	Блок данных, определяющих материальный поток, правила и ресурсы для его преобразования		
		Группа данных о номенклатуре выпускаемых изделий	Группа данных о производственных процессах	Группа данных о производственных ресурсах
Описание групп данных, на которые имеются ссылки	Данные о портфеле заказов, производственной программе. Показатели работы кооперационной схемы, целевые показатели эффективности (KPI)	Конструктивно-технологические параметры номенклатурных позиций. Конструкторская документация	Описание технологических процессов, процессов транспортировки, а также ссылки на необходимые технологические ресурсы, показатели стабильности технологических процессов.	Состав имеющихся технологических ресурсов, показатели их доступности и надежности. Описание стоимостных показателей использования ресурсов и хранения незавершенного производства
Наименование систем, с которыми производится информационное взаимодействие цифрового двойника ПЛС	Системы управления производственными процессами (APS, MES). Системы мониторинга и диспетчеризации (SCADA, MDC, MDA)	Системы технологической подготовки производства и управления жизненным циклом изделий (PDM, CAD/CAE, CAM/CAPP)	Системы технологической подготовки производства и управления жизненным циклом изделий (PDM, CAD/CAE, CAM/CAPP)	Системы управления ресурсами предприятия и производством (ERP). Системы мониторинга и диспетчеризации (SCADA, MDC, MDA)

Построение цифрового двойника ПЛС машиностроительного предприятия невозможно без наличия функционирующих информационных систем предприятия, осуществляющих согласованное управление производственными и организационно-экономическими процессами на различных уровнях управления предприятием. В соответствии с этим предложена структурная модель построения цифрового двойника ПЛС машиностроительных предприятий (рисунок).

Взаимодействие цифрового двойника с материально-техническими объектами ПЛС машиностроительного предприятия (производственным уровнем) реализуется системами управления производством и оперативно-календарного планирования путем генерирования производственных расписаний и заданий. Обратная связь от материально-технического объекта ПЛС с его цифровым двойником осуществляется через системы управления производством или с помощью систем мониторинга и диспетчеризации [6, 14–17].

Объем данных и частота их обновления в различных информационных системах могут сильно различаться. Из систем, входящих в состав цифрового двойника, можно выделить такие, данные которых можно считать условно постоянными (системы технологической подготовки производства, управления предприятием верхнего уровня), системы со средней частотой обновления данных (системы оперативно-календарного планирования) и высокой частотой обновления данных (системы сбора производственных данных, диагностики и мониторинга). Общий объем всех данных существующей информационной инфраструктуры машиностроительного предприятия безусловно очень велик, и задачу по их структурированию и обработке можно отнести к технологиям Big Data. Однако реализация цифрового двойника не предполагает создания копий данных о ПЛС, собранных из всех информационных систем предприятия. Цифровой двойник должен объединять информацию из разных источников за счет выстроенной структуры данных и налаженных связей между системами, при этом информация может оставаться в существующих информационных системах. Более того, разработка цифрового двойника предполагает необходимость выбора и фильтрации только содержательных данных, необходимых и достаточных для решения конкретных задач, одними из которых являются задачи оценки и анализа ПЛС [23]. Таким образом, цифровой двойник объединяет и связывает существующие информационные системы, т. е. является своего рода надстройкой над существующей информационной средой предприятия и предъявляет определенные требования к имеющимся данным, а также к дополнительным данным при их отсутствии [2, 6, 16].



Структурная модель построения цифрового двойника (ЦД) ПЛС машиностроительного предприятия

Заключение. Решение задач анализа, моделирования, оценки, прогнозирования состояния и управления ПЛС невозможно без целостных, логически связанных исходных данных о ней, обновляющихся в реальном времени, что можно решить путем разработки цифрового двойника ПЛС.

Разработка и сопровождение цифрового двойника ПЛС выполняются на базе его информационной модели, которая определяет требования к структуре данных, необходимых для решения соответствующих задач, процессам их актуализации и, следовательно, к составу и взаимодействию информационных систем, содержащих и обрабатывающих эти данные.

Предложенный способ информационного обеспечения задач, решаемых цифровым двойником, позволит оперативно формировать соответствующие локальные информационные модели, содержащие актуальные данные о ПЛС машиностроительного предприятия.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Боровков А.И., Рябов Ю.А. Цифровые двойники: определение, подходы и методы разработки. *Сб. тр. науч.-практ. конф. «Цифровая трансформация экономики и промышленности»*. СПб., СПбПУ, 2019, с. 234–245.
- [2] Архангельский В.Е. Требования к системам планирования производства в контексте концепции «Индустрия 4.0». *VII Междунар. форум «Информационные технологии на службе оборонно-промышленного комплекса России»*, 2018.
URL: <http://xn--h1aelen.xn--p1ai/wp-content/uploads/2018/05/Arhangelskij.pdf> (дата обращения: 18.02.2020).
- [3] Архангельский В.Е. Операционная модель производства как стандартный компонент средств оперативного планирования позаказного производства. *VI Междунар. форум «Информационные технологии на службе оборонно-промышленного комплекса России»*, 2017. URL: http://aamc.ru/wp-content/uploads/2018/06/ГОРК2017-ArkhangelskyVE-WithNotes_v102.pdf (дата обращения: 18.02.2020).
- [4] 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>
- [5] Kutin A.A., Dolgov V.A., Kabanov A.A., et al. Competitive-resource information model of the machine building manufacturing system. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2018, vol. 448, art. 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012008>
- [6] Долгов В.А., Кабанов А.А. Основные подходы к формированию информационной модели производственно-технологической системы машиностроительного предприятия. *Автоматизация. Современные технологии*, 2018, т. 72, № 4, с. 178–184.
- [7] 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>

- [8] Grieves M. Product lifecycle management. New York, McGraw Hill, 2005.
- [9] Что такое цифровой двойник и для чего он нужен? *blogs.3ds.com: веб-сайт*. URL: <https://blogs.3ds.com/russia/digital-twin> (дата обращения: 18.02.2020).
- [10] Okunev A.P., Borovkov A.I., Karev A.S., et al. Digital modeling and testing of tractor characteristics. *Russ. Engin. Res.*, 2019, vol. 39, no. 6, pp. 453–458. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19060157>
- [11] Grigoriev S.N., Martinov G.M. Research and development of a cross-platform CNC kernel for multi-axis machine tool. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 517–522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.051>
- [12] Tomovic C.L., Ncube L.B., Walton A., et al. Development of product lifecycle management metrics: measuring the impact of PLM. *IJMTM*, 2010, vol. 19, no. 3/4, pp. 167–179. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2010.031366>
- [13] Долгов В.А., Подкидышев А.А., Дацюк И.В. и др. Семантические модели технологических систем для имитационного моделирования производственных процессов. *Автоматизация. Современные технологии*, 2018, т. 72, № 8, с. 350–354.
- [14] Nikishechkin P., Chervonnova N., Nikich A. Approach to the construction of specialized portable terminals for monitoring and controlling technological equipment. *MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 224, art. 01089. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401089>
- [15] Lu Y., Liu C., Wang K.I-K., et al. Digital twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2020, vol. 61, art. 101837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>
- [16] Cai Y., Starly B., Cohen P., et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing. *Procedia Manuf.*, 2017, vol. 10, pp. 1031–1042. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.094>
- [17] Grigoriev S.N., Martinov G.M. The control platform for decomposition and synthesis of specialized CNC systems. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 41, pp. 858–863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.031>
- [18] 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>
- [19] Martinov G.M., Nikishechkin P.A., Grigoriev A.S., et al. Organizing interaction of basic components in the CNC system AxiOMA control for integrating new technologies and solutions. *Autom. Remote Control*, 2019, vol. 80, no. 3, pp. 584–591. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117919030159>
- [20] Kutin A.A., Dolgov V.A., Kabanov A.A., et al. Improving the efficiency of CNC machine tools with multi-pallet systems in machine-building manufacturing. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2018, vol. 448, art. 012010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012010>
- [21] Kovalev I.A., Nikishechkin P.A., Grigoriev A.S. Approach to programmable controller building by its main modules synthesizing based on requirements specification for industrial automation. *Proc. ICIEAM*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076121>

[22] Grigoriev S.N., Gurin V.D., Volosova M.A. 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>

[23] 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>

Григорьев Сергей Николаевич — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Высокоэффективные технологии обработки» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (Российская Федерация, 127055, Москва, Вадковский переулок, д. 1).

Долгов Виталий Анатольевич — д-р техн. наук, доцент, генеральный директор ООО «Фабрика Цифровых Систем» (Российская Федерация, 127018, Москва, ул. Суцёвский вал, д. 16, стр. 6).

Никишечкин Петр Анатольевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Компьютерные системы управления» ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН» (Российская Федерация, 127055, Москва, Вадковский переулок, д. 1); ведущий инженер ООО «Фабрика Цифровых Систем» (Российская Федерация, 127018, Москва, ул. Суцёвский вал, д. 16, стр. 6).

Долгов Никита Витальевич — инженер ООО «Фабрика Цифровых Систем» (Российская Федерация, 127018, Москва, ул. Суцёвский вал, д. 16, стр. 6).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Григорьев С.Н., Долгов В.А., Никишечкин П.А. и др. Разработка структурной модели цифрового двойника производственно-логистической системы машиностроительных предприятий. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2021, № 2 (137), с. 43–58.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-43-58>

DEVELOPMENT OF A STRUCTURAL MODEL OF A DIGITAL TWIN OF MACHINE-BUILDING ENTERPRISES PRODUCTION AND LOGISTICS SYSTEM

S.N. Grigoriev¹

s.grigoriev@stankin.ru

V.A. Dolgov²

dolgov@digitalfabrika.ru

P.A. Nikishechkin^{1,2}

npa@digitalfabrika.ru

N.V. Dolgov²

dnv@digitalfabrika.ru

¹ Moscow State University of Technology “STANKIN”,
Moscow, Russian Federation

² LLC “Digital Systems Factory”, Moscow, Russian Federation

Abstract

The purpose of the paper was to consider theoretical aspects of creating digital twins of objects and processes, investigate current trends in the development of modern engineering enterprises, and formulate goals and objectives of the development of a digital twin of the production and logistics system of a mechanical engineering enterprise. We found that the solution of the problems of analysis, assessment and forecasting of the state of the production and logistics system is based on the development with a given degree of adequacy of an information model which describes the aspects of the functioning of its main subsystems in accordance with the goals and objectives solved by the digital twin. It is impossible to create such an information model without integral and logically related initial data on the production and logistics system, the sources of which can be the information systems of the enterprise that consistently manage production, organizational and economic processes at various levels of enterprise management. In accordance with this, we introduced a structural model of the digital twin of the production and logistics system and developed the data structure of the information model of the production and logistics system of a mechanical engineering enterprise. Furthermore, we formulated the requirements for the composition and interaction of enterprise information systems containing and processing data for building a digital twin of the production and logistics system. Finally, we proposed a generalized approach to the information support of tasks solved by a digital twin, which consists in the formation of local information models containing relevant data on the production and logistics system of a machine-building enterprise

Keywords

Digital twin, production and logistics system, mechanical engineering enterprise, information model, industry 4.0

Received 02.07.2020

Accepted 17.08.2020

© Author(s), 2021

REFERENCES

- [1] Borovkov A.I., Ryabov Yu.A. [Digital twins: definition, approaches and methods of development]. *Sb. tr. nauch.-prakt. konf. "Tsifrovaya transformatsiya ekonomiki i promyshlennosti"* [Proc. Sc.-Pract. Conf. "Digital Transformation of Economy and Industry"]. St. Petersburg, SPbPU Publ., 2019, pp. 234–245 (in Russ.).
- [2] Arkhangel'skiy V.E. [Production planning system requirements in the scope of "Industry 4.0" conception]. *VII Mezhdunar. forum "Informatsionnye tekhnologii na sluzhbe oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii"* [VII Int. Forum "Information Technologies on Duty of Russian Defence Industry Complex"], 2018 (in Russ.). Available at: <http://xn--h1aelen.xn--p1ai/wp-content/uploads/2018/05/Arhangel'skiy.pdf> (accessed: 18.02.2020).

- [3] Arkhangel'skiy V.E. [Operational production model as a standard component of operational planning facility for production by order]. *VI Mezhdunar. forum "Informatsionnye tekhnologii na sluzhbe oboronno-promyshlennogo kompleksa Rossii"* [VI Int. Forum "Information Technologies on Duty of Russian Defense Industry Complex"], 2017 (in Russ.). Available at: http://aamc.ru/wp-content/uploads/2018/06/ITOPK2017-ArkhangelskyVE-WithNotes_v102.pdf (accessed: 18.02.2020).
- [4] 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>
- [5] Kutin A.A., Dolgov V.A., Kabanov A.A., et al. Competitive-resource information model of the machine building manufacturing system. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2018, vol. 448, art. 012008. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012008>
- [6] Dolgov V.A., Kabanov A.A. The main approaches to the information model formation for the production and technological system of a machine building enterprise. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern Technologies], 2018, vol. 72, no. 4, pp. 178–184 (in Russ.).
- [7] 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>
- [8] Grieves M. Product lifecycle management. New York, McGraw Hill, 2005.
- [9] Chto takoe tsifrovoy dvoynik i dlya chego on nuzhen? [What is a digital twin and what is it for?] *blogs.3ds.com: website* (in Russ.). Available at: <https://blogs.3ds.com/russia/digital-twin> (accessed: 18.02.2020).
- [10] Okunev A.P., Borovkov A.I., Karev A.S., et al. Digital modeling and testing of tractor characteristics. *Russ. Engin. Res.*, 2019, vol. 39, no. 6, pp. 453–458. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068798X19060157>
- [11] Grigoriev S.N., Martinov G.M. Research and development of a cross-platform CNC kernel for multi-axis machine tool. *Procedia CIRP*, 2014, vol. 14, pp. 517–522. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.051>
- [12] Tomovic C.L., Ncube L.B., Walton A., et al. Development of product lifecycle management metrics: measuring the impact of PLM. *IJMTM*, 2010, vol. 19, no. 3/4, pp. 167–179. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJMTM.2010.031366>
- [13] Dolgov V.A., Podkidyshev A.A., Datsyuk I.V., et al. Semantic models of technological systems for production processes simulation. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* [Automation. Modern Technologies], 2018, vol. 72, no. 8, pp. 350–354 (in Russ.).
- [14] Nikishechkin P., Chervonnova N., Nikich A. Approach to the construction of specialized portable terminals for monitoring and controlling technological equipment. *MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 224, art. 01089. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401089>
- [15] Lu Y., Liu C., Wang K.I-K., et al. Digital twin-driven smart manufacturing: conotation, reference model, applications and research issues. *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, 2020, vol. 61, art. 101837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>

- [16] Cai Y., Starly B., Cohen P., et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing. *Procedia Manuf.*, 2017, vol. 10, pp. 1031–1042. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.094>
- [17] Grigoriev S.N., Martinov G.M. The control platform for decomposition and synthesis of specialized CNC systems. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 41, pp. 858–863. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.031>
- [18] 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>
- [19] Martinov G.M., Nikishechkin P.A., Grigoriev A.S., et al. Organizing interaction of basic components in the CNC system AxiOMA control for integrating new technologies and solutions. *Autom. Remote Control*, 2019, vol. 80, no. 3, pp. 584–591. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117919030159>
- [20] Kutin A.A., Dolgov V.A., Kabanov A.A., et al. Improving the efficiency of CNC machine tools with multi-pallet systems in machine-building manufacturing. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2018, vol. 448, art. 012010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/448/1/012010>
- [21] Kovalev I.A., Nikishechkin P.A., Grigoriev A.S. Approach to programmable controller building by its main modules synthesizing based on requirements specification for industrial automation. *Proc. ICIEAM*, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076121>
- [22] Grigoriev S.N., Gurin V.D., Volosova M.A. 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>
- [23] 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>

Grigoriev S.N. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Department of High-Efficiency Machining Technologies, Moscow State University of Technology “STANKIN” (Vadkovsky pereulok 1, Moscow, 127055 Russian Federation).

Dolgov V.A. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Director General, LLC “Digital Systems Factory” (Sushchyovskiy val ul. 16, str. 6, Moscow, 127018 Russian Federation).

Nikishechkin P.A. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Computer Control Systems, Moscow State University of Technology “STANKIN” (Vadkovsky pereulok 1, Moscow, 127055 Russian Federation); Lead Engineer, LLC “Digital Systems Factory” (Sushchyovskiy val ul. 16, str. 6, Moscow, 127018 Russian Federation).

Dolgov N.V. — Engineer, LLC “Digital Systems Factory” (Sushchyovskiy val ul. 16, str. 6, Moscow, 127018 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Grigoriev 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. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2021, no. 2 (137), pp. 43–58 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2021-2-43-58>

В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышел в свет учебник
под ред. **А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева**
«Теплотехника»



Рассмотрены основы термодинамики и теории теплообмена, топливо и его горение, схемы и элементы расчета котлов, промышленных печей, паро- и газотурбинных, когенерационных и микрогазотурбинных установок, газоперекачивающих станций магистральных газопроводов, поршневых двигателей внутреннего и внешнего сгорания, ракетных, ракетно-прямоточных и авиационных двигателей, холодильных установок, компрессоров и вакуумных насосов, атомных и плазменных энергоустановок. Приведены расчеты систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. Включены разделы, касающиеся космических энергоустановок, теплообменных аппаратов, гидромашин, фотонных энергосистем, криогенных систем для ожижения газов, разделения воздуха, получения неона, криптона и ксенона, а также систем регулирования. Большое внимание в книге уделено вопросам экологии, защиты окружающей среды и возобновляемым источникам энергии.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, корп. 1

+7 (499) 263-60-45

press@bmstu.ru

<https://bmstu.press>