Труды МАИ. 2025. № 141
Trudy MAI. 2025. No. 141. (In Russ.)

Научная статья

УДК 65.011.56

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184512>

EDN: <https://www.elibrary.ru/VFDRLK>

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ ОРГАНИЗАЦИИ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ, ПОСТРОЕНИЕ, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Екатерина Сергеевна Лесик¹, Сергей Николаевич Падалко^{2✉},

Андрей Михайлович Станкевич³

^{1,2,3}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Москва, Российская Федерация

¹klesik@inmas.ru

²snp@inmas.ru✉

³stan@inmas.ru

Аннотация. В статье определена цифровая модель организации как системы ресурсов (материальных, кадровых, информационных, финансовых и т.д.), которая обеспечивает производство заказываемых у этой организации продукции. В качестве источника информации, используемой для построения цифровой модели промышленной организации, в статье предложено использование конструкторской, технологической и производственной документации, разработанной на этапах проектирования и постановки на производство продукции моделируемой организации. Это позволяет гарантировать адекватность цифровой модели и организации, как объекта моделирования. Цифровая модель, построенная на основе нормативной документации предприятия, содержит информацию о различных видах деятельности организации, например, производственных, логистических, финансовых и других процессах. В результате цифровой двойник промышленного предприятия, построенный на основе предлагаемой цифровой модели организации,

позволяет накапливать и анализировать информацию о различных аспектах деятельности предприятия, что существенно расширяет возможности предприятия по предиктивному управлению. В качестве среды реализации цифровой модели организации предлагается использование систем класса ERP, функционал которых может быть расширен за счет возможности решения на их базе задач планирования, управления и оптимизации ресурсов организаций с использованием математических методов.

Ключевые слова: цифровая модель организации, цифровой двойник организации, система управления, ERP-система

Для цитирования: Лесик Е.С., Падалко С.Н., Станкевич А.М. Цифровая модель организации: определение, построение, использование // Труды МАИ. 2025. № 141.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184512>

Original article

DIGITAL MODEL OF THE ORGANIZATION: DEFINITION, DESIGNING, APPLYING

Ekaterina S. Lesik¹, Sergey N. Padalko²✉, Andrey M. Stankevich³

^{1,2,3}Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,
Moscow, Russian Federation

¹klesik@inmas.ru

²snp@inmas.ru✉

³stan@inmas.ru

Abstract. The article defines a digital model of an organization as a system of resources (material, personnel, information, financial, etc.), which ensures the production of products ordered from this organization. A change in the state of an organization is presented in this article as a change in the state of resources included in the digital model. These changes occur as a result of the organization performing its work, and in the digital model of this

organization - as a result of executing model mapping. The article proposes to use design, technological and production documentation developed at the stages of design and launching into manufacture of products of the modeled organization as a source of information used to build a digital model of an industrial organization. This ensures the adequacy of the digital model and the organization as an object of modeling. A digital model built on the basis of the regulatory documentation of the organization contains information on various types of activities of the organization, for example, production, logistics, financial and other processes. As a result, a digital twin of an industrial organization built on the basis of the proposed digital model of the organization allows accumulating and analyzing information on various aspects of the organization's activities, which significantly expands the organization's capabilities for predictive management. As an environment for implementing a digital model of an organization, it is proposed to use ERP class systems, the functionality of which can be expanded due to the possibility of solving on their basis the problems of planning, management and optimization of organizational resources using mathematical methods.

Keywords: digital model of an organization, digital twin of an organization, management system, ERP system

For citation: Lesik E.S., Padalko S.N., Stankevich A.M. Digital model of the organization: definition, designing, applying. *Trudy MAI*. 2025. No. 141. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184512>

Введение

Достигнутый к настоящему времени уровень автоматизации промышленных организаций определяет их как целостные организационно-технические системы, охватывающие все виды деятельности организаций. При этом обеспечиваются наблюдаемость, прослеживаемость и возможности расчета различного рода показателей, оценивающих деятельность организаций.

Что касается использования математических методов при решении даже типовых для организаций задач планирования, управления и развития, то даже в

развитых автоматизированных системах организаций они представлены незначительно, в связи с чем эти системы в настоящее время выполняют в основном функции учета и отчетности. В то же время, известен многочисленный набор математических методов и реализующих их пакетов прикладных программ, способных обеспечить решение значительного числа практических задач в рамках автоматизированных систем организаций [1, 2]. Однако эти методы в настоящее время нашли применение только при автономном (вне рамок комплексных автоматизированных систем организаций) решении локальных задач, как правило, в «штучном» режиме, т.к. для каждой из них должны быть специально построены модели отдельных аспектов деятельности организаций [3].

Регулярное использование современных математических методов в деятельности организаций является одним из основных направлений их развития в рамках общей концепции создания цифровых организаций [4]. Решение задачи интеграции математического аппарата в указанную концепцию требует построения формальной модели организации, которая должна, с одной стороны, адекватно описывать широкий круг организаций и их структурных компонент (подразделений), а с другой, соответствовать устоявшимся требованиям к ней пакетов программ численных методов. Ниже представлена такая модель, получившая название цифровой, дается её определение, принцип построения и реализации в среде программных систем класса ERP. При этом вначале дается общее определение цифровой модели (ЦМ) как отдельного класса моделей, после чего определяется цифровая модель организаций, как класса моделируемых систем, а далее – их экземпляров (конкретных организаций).

1. Общее определение цифровой модели

Модель - весьма часто используемое понятие, определяемое самым различным образом: от философских категорий до формальных, математических. В настоящее время все более широко используется новый, появившийся недавно термин «цифровая модель». Определение этого термина и его трактовка не являются устоявшимися. Поэтому ниже дается общее определение цифровой модели, которое

далее конкретизируется применительно к организации как объекту моделирования и используется при дальнейшем изложении.

Считается, что цифровая модель является частным случаем математической модели (M), которая в общем случае определяется парой:

$$M = (P, F), \text{ где} \quad (1)$$

- P - набор элементов, непосредственно определяющих моделируемый объект и называемых далее переменными модели;
- F - связи между переменными модели.

Отличительной чертой цифровой модели является то, что связи между переменными задаются в виде компьютерной программы. Отсюда следует, что связи цифровых моделей являются отображениями, а переменные являются цифровыми, их кодировка зависит от системы программирования, в среде которой создана программа, реализующая связь модели. При этом переменные делятся на две группы: входные и выходные переменные.

$$P = \{\Omega, V\}, \Omega \cap V = \emptyset, F: \Omega \Rightarrow V, \text{ где} \quad (2)$$

- Ω – входные переменные;
- V – выходные переменные.

К такому виду может быть приведена любая математическая модель, среди переменных которой могут находиться различные математические объекты: не только числовые, но и функциональные, лингвистические и их производные. При переводе модели в цифровой вид, пригодный для их компьютерной обработки, все переменные модели должны быть сведены к числовым. Например, путем простого кодирования типа нумерации, применения аппарата нечетких множеств и др. А связи модели всегда могут быть сведены к отображениям, реализуемым далее в виде компьютерной программы, и ограничениям на отдельные переменные модели, при этом, возможно, часть из этих связей и переменных потребуется ввести в состав модели дополнительно [5].

Считается, что рассматриваемая модель, называемая далее исходной, состоит из набора частных моделей, называемых далее элементарными (m):

$$M = \{m(j)\}, \text{ где } j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (3)$$

каждая из которых с учетом сказанного определяется в виде:

$$m(j) = (\omega(j), v(j), f(j)), \quad f(j): \omega(j) \Rightarrow v(j). \quad (4)$$

Элементарные модели, как правило, являются связанными по их входам и выходам. А именно, пара элементарных моделей является связанной, если входные переменные одной из них пересекаются с выходными переменными другой. Исходная модель как множество элементарных моделей и связей между ними может быть представлена в виде матрицы смежности (таблица 1), в которой строки соответствуют отображениям модели, а столбцы переменным. Значениями её элементов являются: 1, если переменная, соответствующая столбцу рассматриваемого элемента, входит в состав переменных отображения, соответствующего строке этого же элемента матрицы; 0 – в противном случае. Поскольку в матрице смежности не учитывается ориентация связей между отображениями, т.е. различие между входными и выходными переменными, то для учета этого различия далее считается, что выходная переменная отображения располагается в столбце с наименьшим номером по сравнению с входными переменными. При отсутствии циклов в структуре модели данный прием корректен.

Общее представление цифровой модели

Таблица 1

F \ P	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)	P(6)	Множество отношений ЦМ
F(1)	1	0	1	0	1	1	$F(1): P(3), P(5), P(6) \Rightarrow P(1)$
F(2)	0	1	0	1	0	1	$F(2): P(4), P(6) \Rightarrow P(2)$
F(3)	0	0	1	0	1	0	$F(3): P(5) \Rightarrow P(3)$
F(4)	0	0	0	1	1	1	$F(4): P(5), P(6) \Rightarrow P(4)$
F(5)	0	0	0	0	1	1	$F(5): P(6) \Rightarrow P(5)$

Итак, в дальнейшем цифровая модель в общем случае определяется как множество отображений, информационно связанных по входам-выходам, и представляется в виде матрицы смежности с указанным выше упорядочиванием переменных в её строках.

2. Определение цифровой модели организаций

Определение цифровой модели организаций базируется на общем представлении ЦМ (3), (4) и состоит в присвоении «обезличенным» переменным ЦМ понятий, которыми определяются организации как отдельный класс систем. При этом вначале рассматривается обобщенное представление производственных организаций и соответствующая им ЦМ. А далее определяются ЦМ следующего уровня детализации – ЦМ конкретных организаций, производящих характерные для каждой из них продукции.

2.1. Определение переменных ЦМ организации

Организация определяется как взаимосвязанный набор всех видов ресурсов (материальных, кадровых, информационных, финансовых и т.д.), который обеспечивает производство заказываемых у этой организации видов продукции.

Каждый ресурс имеет собственное наименование. Ресурсы, имеющие одинаковое наименование, объединены в группы. Каждая такая группа далее называется типом и определяется тем же уникальным наименованием, что и образующие её ресурсы, а также их количеством.

Считается, что набор уникальных наименований (типов, далее в совокупности - номенклатура) ресурсов организации является постоянным, наименования пронумерованы числами натурального ряда. А количество ресурсов каждого типа изменяется во времени в результате создания и потребления ресурсов в процессе функционирования организации. В итоге организация определяется как динамическая система следующим образом:

$$S(t) = \{r(i), N(i, t)\}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, k, \quad \text{где} \quad (5)$$

- $S(t)$ – состояние организации в момент времени t ;

- $r(i)$ – наименование ресурсов i -го типа.
- $N(i,t)$ – количество ресурсов i -го типа, имеющихся в составе организации, в момент времени t .
- k – число типов ресурсов, составляющих организацию.

Согласно принятой выше цифровой идентификации типа ресурсов:

$$r(i) = i \quad (6)$$

Тогда пара $(r(i), N(i,t))$ может быть представлена её компонентой $N(i,t)$, а состояние организации определено в виде:

$$S(t) = N(I,t), \text{ где} \quad (7)$$

$$N(I,t) = \{N(i,t)\}, i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (8)$$

В дальнейшем состояние организации будем определять положением в k -мерном пространстве (в теории управления называемом фазовым), координатам которого $P = p(I) = \{p(i)\}, i = 1, 2, 3, \dots, k$ ставятся в соответствие составляющие эту организацию типы ресурсов с тем же номером:

$$p(i) \Leftrightarrow r(i), i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (9)$$

Состояние организации в каждый конкретный момент времени отображается точкой в этом пространстве, определяемой количеством ресурсов каждого типа, которым организация располагает в этот момент. А изменение ресурсов организации в процессе её функционирования отображается перемещением этой точки.

2.2. Определение отображений ЦМ организации

Согласно общему определению ЦМ (2), отображение модели определяется как правило, связывающее входные и выходные переменные. При рассмотрении ЦМ организации это правило трактуется как изменение количеств одних ресурсов (выход) за счет изменения количества других ресурсов организации (вход). Эти изменения происходят в результате выполнения организацией ее работ, а в модели этой организации – в результате выполнения отображений, являющихся в данном контексте визави работ.

При выполнении каждой работы изменения ресурсов организации происходят дважды последовательно: в начале и при завершении выполнения этой работы. В начале работы ресурсы, необходимые для ее выполнения, вычитаются из ресурсов организации, и эта часть ресурсов не может быть использована для выполнения других работ. При завершении работы ресурсы, оставшиеся от использовавшихся и вновь полученные, добавляются к ресурсам, которыми располагает организация в этот момент, и они могут быть использованы для выполнения других работ. Соответственно, каждое отображение ЦМ состоит из двух частей. Первая часть выполняется в момент начала выполнения работы, а вторая – после её завершения.

Особо отметим, что названные изменения происходят дискретно, в связи с чем функции $N(I,t)$, характеризующие состояние ресурсов организации, являются кусочно-постоянными с разрывами в моменты (в точках) начала и завершения выполнения работ. Соответственно, каждое из этих событий характеризуется двумя состояниями ресурсов организаций: до их наступления и после. В дальнейшем считается, что эти состояния разделены во времени малым интервалом ε .

Для формализации сказанного введем следующую систему обозначений. В ней считается, что каждый из ресурсов, определяющих организацию в текущий момент времени, был ею же произведен до этого в результате выполнения соответствующей работы (был продукцией: изготовленной, купленной, взятой в аренду и т.п.). Т.е. используемые далее два понятия: ресурс и продукция - определяются одной сущностью, которая называется «продукция» до выполнения работы по её изготовлению и «ресурс» - после. Эти два понятия тождественны и используются в зависимости от контекста.

Далее без нарушения общности для простоты изложения считается, что с каждой работой связан один конкретный тип продукции. И обратно, каждый тип продукции является результатом выполнения конкретной работы и порождается только этой работой. В силу данных условий и отмеченной выше тождественности понятий продукция и ресурс для идентификации работ, типов ресурсов и, соответственно, типов продукции возможно использование единой, связывающей их

системы нумерации (идентификации). А именно, числами натурального ряда от 1 до k .

Используя принятую систему идентификации, обозначим:

- $N(i, t)$ – количество ресурса i -го типа, которым организация располагает в момент времени t ;
- $t^*(j)$ – момент, предшествующий началу выполнения работы j -го типа (до изменения ресурсов);
- $\tau^*(j) = t^*(j) + \varepsilon$ – момент начала выполнения работы j -го типа (ресурсы изменены);
- $t^{**}(j)$ – момент завершения выполнения работы j -го типа (ресурсы изменены);
- $\tau^{**}(j) = t^{**}(j) - \varepsilon$ – момент, предшествующий завершению выполнения работы j -го типа (до изменения ресурсов);
- $\Delta(j)$ – длительность выполнения работы j -го типа;

$$\Delta(j) = t^{**}(j) - t^*(j), \quad (10)$$

- $N(i, t^*(j))$, $N(i, t^{**}(j))$ – количество ресурса i -го типа, которым располагает организация (моделируемая система) до момента начала выполнения работы j -го типа и после её завершения, соответственно;
- $Q(j)$ – множество типов ресурсов, необходимых для выполнения работы j -го типа;
- $q(i, j)$ – количество ресурса i -го типа (где $i \in Q(j)$), необходимое для выполнения работы j -го типа;
- $H(j)$ – множество типов ресурсов, оставшихся и полученных вновь в результате выполнения работы j -го типа;
- $h(i, j)$ – количество ресурса i -го типа (где $i \in H(j)$), оставшееся или полученное в результате выполнения работы j -го типа;

- $F(j)$ – связь, отражающая изменения состояния организации, связанные с выполнением работы j -го типа:

$$F(j) = \{F_1(j), F_2(j)\}, \text{ где} \quad (11)$$

- $F_1(j)$ – связь, отражающая изменение ресурсов организации в момент начала выполнения работы j -го типа;
- $F_2(j)$ – связь, отражающая изменение ресурсов организации в момент завершения выполнения работы j -го типа.

В принятых обозначениях связи ЦМ организации формулируются следующим образом:

$$F_1(j): \{N(i, t^*(j))\}_i \Rightarrow \{N(i, \tau^*(j))\}_i, i \in Q(j) \text{ или} \quad (12)$$

$$N(i, \tau^*(j)) = N(i, t^*(j)) - q(i, j), i \in Q(j) \quad (13)$$

$$F_2(j): \{N(i, \tau^{**}(j))\}_i \Rightarrow \{N(i, t^{**}(j))\}_i, i \in H(j) \text{ или} \quad (14)$$

$$N(i, t^{**}(j)) = N(i, \tau^{**}(j)) + h(i, j), i \in H(j) \quad (15)$$

В итоге цифровая модель организации представляется как множество отображений, которое ставится в соответствие множеству работ, выполняемых моделируемой организацией, следующим образом:

- выходной переменной соответствует продукция, получаемая в результате выполнения работы, соответствующей этому отображению;
- входным переменным соответствуют ресурсы, необходимые для выполнения этой работы;
- каждое отображение $F(j)$ модели однозначно соответствует определенной работе, а его исполнение - выполнению работы, в результате чего изменяется состояние организации. Эти изменения происходят дважды: в начале и при завершении выполнения работы. В модели этому соответствуют два отображения (12) и (14), выполняемых последовательно с интервалом Δ . Эти отображения, по определению ЦМ,

являются программными модулями, в каждом из которых реализованы наборы формул (13) и (15), соответственно.

Особо подчеркнем ограниченную область определения отображения (12), которая задается условием:

$$N(i, \tau^*(j)) - q(i, j) \geq 0, \text{ где } i \in Q(j), i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (16)$$

Т.е. количество ресурса не может быть отрицательным или, другими словами, выполнение j -й работы может быть начато в момент времени $\tau^*(j)$ только, если в этот момент организация содержит все необходимые для её выполнения ресурсы.

ЦМ организации может быть представлена в виде таблицы 2 как расширение представления общей ЦМ, приведенной в таблице 1. Это расширение отражает рассмотренные выше характерные особенности организаций как объектов моделирования. В частности, здесь каждое отображение $F(j)$ содержит две составляющие: $F_1(j)$ и $F_2(j)$. Каждая из них, в отличие от общей ЦМ, содержит количественные значения ресурсов, связываемых этими отображениями. А именно, в строках $F_1(j)$ значения ненулевых элементов соответствуют количествам ресурсов, необходимых для выполнения j -ой работы. В строках $F_2(j)$ значения ненулевых элементов соответствуют количествам ресурсов, оставшимся и полученным в результате выполнения j -ой работы. Такое представление позволяет отследить как качественные (информационные), так и количественные взаимосвязи между переменными модели в виде формул (13), (15).

Представление цифровой модели организации

Таблица 2

№ работы	Отображение модели		$P(1)$	$P(2)$	$P(3)$	$P(4)$	$P(5)$	...	$P(k-1)$	$P(k)$
	1	$F_1(1)$		0	50	20	0	10		20
$F_2(1)$			68	0	0	0	0		0	0
2	$F_1(2)$		0	0	37	0	20		0	30

№ работы	Отображение модели		$P(1)$	$P(2)$	$P(3)$	$P(4)$	$P(5)$	...	$P(k-1)$	$P(k)$
				$F(2)$	$F_2(2)$	0	5	0	0	0
3	$F(3)$	$F_1(3)$	0	0	0	28	6		53	190
		$F_2(3)$	0	0	2	0	0		0	0
4	$F(4)$	$F_1(4)$	0	0	0	0	50		30	0
		$F_2(4)$	0	0	0	20	0		0	0
...										
$k-1$	$F(k-1)$	$F_1(k-1)$	0	0	0	0	0		0	70
		$F_2(k-1)$	0	0	0	0	0		40	0
k	$F(k)$	$F_1(k)$	20	70	0	10	10		0	0
		$F_2(k)$	0	0	0	0	0		0	20
$N(t)$ - Состояние организации в момент времени t			151	143	32	44	23		73	120

Заметим, что в строках, соответствующих отображениям $F(j)$ модели, значения являются неизменными, а в нижней строке $N(t)$, добавленной по отношению к таблице 1, отражается состояние организации в текущий момент времени и изменяется в процессе выполнения работ, составляющих функционирование этой организации.

3. Модель функционирования организации.

Изменения состояния организации в процессе её функционирования в ЦМ определяются переменными $N(I, t)$, которые единственные в представленной модели являются функциями времени. Эти изменения, как было сказано выше, происходят только в моменты начала и завершения выполнения работ, т.е. функции $N(I, t)$ являются кусочно-постоянными. Для их определения введем в рассмотрение

некоторую порядковую шкалу на оси времени T , пронумеруем её числами натурального ряда:

$$T = \{T(\gamma)\}, \text{ где } \gamma = 1, 2, \dots, n, T(\beta) < T(\alpha) \Rightarrow \beta < \alpha \quad (17)$$

И свяжем с ней события, изменяющие состояние организации. Значения «точек» на этой шкале могут быть как заранее фиксированными, например, календарными датами, так и определяться в процессе выполнения работ по их текущим результатам.

При этом отметим, что определяющими являются моменты начала выполнения работ, а моменты их завершения при известной длительности работ являются зависимыми от них (10). Поэтому со шкалой T свяжем, в первую очередь, моменты начала выполнения работ.

В общем случае в каждый момент $T(\gamma)$ могут одновременно начать выполняться только определенные наборы работ. А именно, наборы, удовлетворяющие следующему условию, являющемуся расширением (16): сумма количеств каждого типа ресурса, необходимого для выполнения работ из рассматриваемого набора, не больше количества соответствующего типа ресурса, имеющегося в распоряжении организации. В дальнейшем каждый такой набор работ будем называть допустимым и обозначать $y(T(\gamma))$:

$$y(T(\gamma)) = \{L: \sum_{j \in L} q(i, j) \leq N(i, T(\gamma)) \text{ при } \forall i \in Q(L) = \bigcup_{j \in L} Q(j)\} \quad (18)$$

где L – множество индексов работ, составляющих допустимый набор.

Как правило, в каждый момент $T(\gamma)$ имеется несколько допустимых наборов работ. Пронумеруем их числами натурального ряда, а множество допустимых наборов обозначим $Y(T(\gamma))$:

$$Y(T(\gamma)) = \{y(1), y(2), y(3), \dots, y(k(T(\gamma)))\}, \text{ где} \quad (19)$$

$k(T(\gamma))$ – число допустимых наборов работ.

Для перехода организации в следующее по времени состояние должен быть выбран один из этих наборов. Осуществление этого выбора возлагается на вновь

вводимый в рассмотрение дополнительный тип работ, называемых далее работами-управлениями.

Работы-управления характеризуются следующим образом. Результатом их выполнения является набор работ, передаваемых для выполнения. Этот набор определяется на основе данных о всех ресурсах, располагаемых организацией к началу выполнения работ-управлений, включая оставшиеся и вновь полученные после выполнения ранее начавшихся работ. Работы-управления не вызывают изменения ресурсов (состояния) организации. Длительность их выполнения будем обозначать α и считать её бесконечно малой в случае программной реализации выбора работ, передаваемых на выполнение.

Введем в состав ЦМ работы-управления, поставив им в соответствие отображения, обозначаемые далее G . Свяжем моменты начала/завершения выполнения этих работ со временной шкалой (17). Тогда, согласно сказанному:

$$G(T(\gamma)):Y(T(\gamma)) \Rightarrow y^*(T(\gamma)), \text{ где} \quad (20)$$

$y^*(T(\gamma))$ – множество индексов работ допустимого набора, передаваемых в момент $T(\gamma)$ на выполнение.

Времена завершения выполнения работ также свяжем с используемой временной шкалой, несмотря на то, что эти времена, согласно (10), при заданном значении Δ являются расчетными, и их расчетные значения могут не совпадать с принятой шкалой времени. В этих случаях предлагается за момент завершения выполнения работы принять «точку» шкалы, ближайшую справа от полученного расчетного значения. Данное предположение является корректным, т.к. актуализированные за счет учета результатов выполненных работ ресурсы не потребуются до начала выполнения ближайшей справа работы-управления. В дальнейшем набор работ, выполнение которых завершается в интервале $(T(\gamma-1), T(\gamma))$, будем обозначать $D(\gamma)$.

Таким образом, функционирование организации состоит из выполнения повторяющейся в каждый момент $T(\gamma)$ тройки действий:

- 1) пополнение ресурсов организации вновь произведенной продукцией и ресурсами, оставшимися после выполнения набора работ $D(\gamma)$;
- 2) определение работ, передаваемых на выполнение $y^*(T(\gamma))$;
- 3) резервирование ресурсов, необходимых для выполнения этих работ.

Этим действиям соответствуют отображения F_1 , G , F_2 , соответственно. Причем, поскольку при моделировании временные интервалы между названными действиями бесконечно малые величины, важно учитывать приведенный выше порядок их выполнения, фактические временные интервалы между ними роли не играют. Также отметим, что отображения F_1 и F_2 имеют формульные представления (13) и (15), соответственно, а G является, как правило, решением оптимизационной задачи, рассматриваемой далее в разделе 5.

4. Создание ЦМ конкретной (экземпляра) организации

4.1. Источники информации, определяющей ЦМ конкретной (экземпляра) организации

Рассматриваемое ниже создание ЦМ конкретной организации базируется на представленной выше ЦМ организаций в общем виде и состоит в присвоении её переменным и отображениям данных о продукциях, выпускаемых конкретной моделируемой организацией, и о располагаемых ею ресурсах.

В основу определения источников информации, задающих значения переменным и отображениям при построении ЦМ конкретной организации, положен тот факт, что функционирование каждой организации реализует этап производства освоенной продукции. Это означает, что эта продукция уже прошла предшествующие этапы жизненного цикла, а именно: этапы разработки и подготовки производства. Полученные при этом результаты задают основополагающие требования к формированию/модификации и функционированию организации, производящей рассматриваемую продукцию, и, соответственно, к её модели.

Результатом этапа разработки являются два комплекта документов: конструкторская и технологическая документация (КТД), предназначенная для производства, и эксплуатационно-ремонтная документация (ЭРД), предназначенная

для технической эксплуатации выпускаемой продукции. В этих документах определены требования к составу работ и необходимым для их выполнения ресурсам, которыми должна располагать организация. Эти же документы содержат необходимую информацию, на основе которой, как показано ниже, может быть сформирована ЦМ организации, производящей продукцию по этой документации.

Основными документами, входящими в КТД и ЭРД, согласно действующим стандартам, являются:

1. **Спецификации** – определяют продукции и, соответственно, работы, которые должны быть выполнены в процессе изготовления этих изделий. На основе указанных работ формируется множество отображений цифровой модели производственной организации;
2. **Регламенты обслуживания, бюллетени и т.п.** – определяют работы, которые должны быть выполнены в процессе технической эксплуатации изделий. На их основе формируется множество отображений цифровой модели организации-эксплуатанта;
3. **Технологические карты** являются приложением к каждой j -ой работе – содержат информацию о номенклатуре и количествах как результирующей продукции, так и ресурсах, необходимых для её изготовления. На основе этой информации формируются компоненты отображений $F(j)$, а именно:
 - a. по номенклатуре изделий и ресурсов формируются множества $Q(j)$ и $H(j)$;
 - b. по количествам изделий и ресурсов формируются множества $q(I, j)$ и $h(I, j)$, соответственно.

Сказанное может быть проиллюстрировано в виде таблицы 2 формированием ЦМ, представляющей организацию по названным документам. Здесь каждой позиции спецификации соответствует работа по изготовлению этой позиции, в модели ей соответствуют отображения (12) и (14), а в таблице она порождает пару строк (F_1 , F_2), отражающих изменения состояния организации в моменты начала и завершения

работы по изготовлению рассматриваемой позиции спецификации. Информация для заполнения каждой из строк таблицы содержится в технологических картах или в приложениях к ним. По номенклатуре необходимых ресурсов в строках F_1 определяются ненулевые позиции (Q), а их необходимые количества задают числа в этих позициях (q). По номенклатуре вновь полученных продукции и ресурсов, оставшихся после выполнения работ в строках F_2 определяются ненулевые позиции (H), а числа в них (h) определяются как разность между значением количества ресурса до начала выполнения работы и его нормативного расхода, указанного в технологических картах или в приложениях к ним.

Обратим внимание, что производство организацией конкретной продукции возможно только при условии, что она располагает ресурсами, соответствующими требованиям разработчика, изложенным в КТД/ЭРД на эту продукцию, которую далее будем называть освоенной. В контексте настоящей работы сказанное означает, что продукция считается освоенной, если организация содержит все типы ресурсов, содержащиеся в документации разработчика как необходимые для изготовления рассматриваемой продукции:

$$\bigcup_{i=1}^k r(i) \supseteq \bigcup_{j=1}^k Q(j) \quad (21)$$

Достижение этого условия требует согласования возможностей организации-производителя заданной продукции и требований разработчика к её изготовлению. В соответствии с ГОСТ Р 15.000-2016 «Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП). Основные положения» такое согласование выполняется при постановке этой продукции на производство – на этапе её жизненного цикла между разработкой и изготовлением. При этом, с одной стороны разработчик вносит изменения в свою документацию, а с другой, производитель расширяет/модернизирует свою ресурсную базу. Сформированная/модернизированная в итоге организация, соответствует требованиям КТД и/или ЭРД в части изготавливаемой продукции. Эта же документация, согласно сказанному выше, является основой построения ЦМ организации, изготавливающей эту

продукцию. Т.е. сама организация и её ЦМ имеют единую информацию, на основе которой они строятся. Отсюда следует вывод, что ЦМ конкретной организации, построенная предложенным способом, адекватна этой организации.

Особое место в ЦМ занимают переменные, которые не присутствуют ни в одном из отношений как выходные. Они соответствуют типам ресурсов, присутствующих среди необходимых, но отсутствующих среди производимых. Примером может служить закупаемая продукция. В любой момент времени количество такого типа ресурсов, имеющееся в распоряжении организации и указываемое в нижней строке таблицы 2, будет представлено в виде постоянного большого числа, что имитирует неисчерпаемость соответствующих ресурсов и определяет границы создаваемой ЦМ.

4.2. Реализация ЦМ конкретной организации

ЦМ, по определению, является программной системой, реализация которой, исходя из сказанного выше, должна базироваться на документации разработчика. Эта документация может быть представлена в виде таблиц двух видов для каждой освоенной продукции или, что то же самое, работы по её изготовлению, и идентифицирована их общим номером. Далее такая пара таблиц называется паспортом работы.

Каждая таблица паспорта работы содержит набор пар: номер типа ресурса и его количество. Таблицы первого вида содержат номера типов ресурсов и их количество, необходимые для изготовления соответствующей продукции. А таблицы второго типа – номера типов изготовленной продукции и ресурсов, оставшихся после изготовления продукции, а также их количество согласно КТД/ЭРД. Множество паспортов работ определяет множество освоенных организацией продукций. Заметим, что представленные таблицы фактически являются повторением строк таблицы 2, в которой отсутствуют её нулевые элементы.

На основе паспортов работ организации могут быть реализованы основные компоненты её цифровой модели: множество переменных, определяющих

организацию, и тройка отображений: F_1 , G , F_2 , связывающих эти переменные между собой.

Множество переменных модели, типов ресурсов организации, определяется как объединение всех строк по всем таблицам и может быть реализовано в виде базы данных (БД) цифровой модели организации. Значение каждой такой переменной в БД представляют собой текущее количество $N(i,t)$ соответствующего типа ресурса i , имеющегося в распоряжении организации.

Отображения F_1 и F_2 реализуются в виде k программных модулей каждый. В модулях F_1 запрограммированы $|Q|$ формул (13), а в модулях F_2 - $|H|$ формул (15), где $|Q|$ и $|H|$ - число элементов в наборах Q и H , соответственно. В этих формулах значения переменных N берутся из БД, а переменные q и h - из паспортов. Причем значения переменных q и h являются, по сути, константами, т.к. они могут быть изменены только при изменении документации разработчика. Соответственно, использование табличного представления ЦМ в части реализации отображений F_1 и F_2 носит разовый характер при формировании БД программной системы, реализующей ЦМ организации.

Отображение G реализуется в виде подсистемы рассматриваемой программной системы, решающей задачу определения набора работ, которые должны начаться одновременно в каждой точке принятой шкалы, с использованием численных методов анализа и оптимизации. В обеспечение этого необходимо приведенное выше представление цифровой модели организации трансформировать в характерный для численных методов вид. В контексте данной работы - в систему неравенств (18). Такая трансформация возможна и схематично может быть представлена следующими действиями по построению неравенств (18) на основе таблиц F_1 , при этом считается, что набор работ $F(j)$, входящих в состав $y(T(\gamma))$, для которого строится неравенство (18) и допустимость которого необходимо оценить, уже задан:

1. На основе таблиц F_1 , соответствующих работам из заданного набора $y(T(\gamma))$, определяется множество типов ресурсов, необходимых для выполнения этих работ. Данное множество определяется путем формирования списка уникальных значений из номеров P , соответствующих типам требуемых ресурсов, указанных в заголовках столбцов таблиц F_1 .
2. Для каждого номера (типа ресурса) из сформированного списка определяется перечень работ, для выполнения которых также требуется данный тип ресурса. Данный перечень определяется путем анализа таблиц F_1 : составляется перечень номеров работ, указанных в крайнем левом столбце тех таблиц F_1 , где номер анализируемого типа ресурса присутствует в правых столбцах заголовка таблицы.
3. Для каждого из этих номеров (типов ресурсов) вычисляется общее количество ресурса, необходимого для выполнения всех работ, входящих в анализируемый набор $y(T(\gamma))$. А именно: для каждого номера (типа ресурса), суммируются значения в ячейках, находящиеся под номером анализируемого типа ресурса каждой таблицы F_1 , определенной ранее на шаге 2.
4. В итоге для каждого заданного набора работ можно построить ограничения (18) и оценить допустимость выполнения его работ. Так на основе паспортов работ могут быть построены левые части ограничений (18) в их каноническом представлении, привычные для большинства численных методов анализа и оптимизации, а значения правых частей выбираются из БД, содержащей переменные ЦМ организации и их текущие значения.

Таким образом, на основе документации разработчика, представленной в виде множества паспортов работ по изготовлению освоенной продукции, возможно, во-первых, основываясь на условиях (18), сформировать систему ограничений в виде, принятом для пакетов прикладных программ [2]:

$$\sum_{j \in L} q(i, j) \leq N(i, T(\gamma)), \quad (22)$$

а во-вторых, реализовать ЦМ организации как программную систему.

Одним из первых и основных решений, которые требуется принять при реализации такой системы, является определение инструментальной среды, в которой должна создаваться эта система.

Максимально близким к ЦМ организаций по содержанию переменных и связей между ними является класс программных систем, получивших название Enterprise Resource Planning (ERP-систем) [6]. База данных таких систем ориентирована на хранение информации о всех располагаемых организацией ресурсах и о их изменениях в процессе её функционирования, и может быть настроена на размещение в ней множества переменных ЦМ - ресурсов конкретной организации и их количеств. Программные приложения ERP-систем реализуют операции, связанные с изменениями ресурсов организации в процессе её деятельности. В том числе, операции, связанные с началом выполнения работ и с их завершением – аналоги отображений F_1 и F_2 . Использование программных модулей, реализующих эти отображения, как приложений ERP-системы, позволяет осуществить связь этих модулей с базой данных и, соответственно, обеспечить модель актуальными исходными данными о ресурсах организации.

Таким образом, цифровая модель организации представляет собой множество паспортов её отображений и соответствующих им программных модулей. Эти паспорта создаются автоматически на основе документации на освоённую организацией продукцию, а программные модули - путем кодирования формульных зависимостей, которые формируются по паспортам отображений. В случае создания модели в среде ERP-системы моделируемой организации её формулы и, соответственно, программные модули могут быть обеспечены актуальными данными из БД ERP-системы.

Существенным и весьма важным компонентом цифровой модели является её формульная часть, отсутствующая в известных ERP-системах. Она соответствует принятому представлению моделей при решении на их базе практических задач с

использованием пакетов программ численных методов анализа и оптимизации. Тем самым обеспечивается интеграция ЦМ с этими пакетами, а при реализации ЦМ в среде ERP-систем можно говорить о соответствующем расширении функционала систем этого класса, состоящего в решении практических задач организаций на основе их моделирования и решения задач оптимизации.

5. Возможности решения практических задач на базе ЦМ

При определении множества задач, которые могут быть решены на базе ЦМ организации, считается, что эта модель создана и присутствует в виде множества программных модулей, реализующих отображения (12), (14), и их паспортов. Также считается, что постановка каждой задачи может быть структурирована и представлена тройкой (u, x, k) , где

- u – набор переменных, значения которых должны быть определены;
- x – набор переменных, значения которых заданы (фиксированы или ограничены), т.е. ограничивают значения переменных u ;
- k - критерий(ии) выбора решения. Вводится в рассмотрение, если при заданных значениях x существуют больше одного решения u .

При использовании ЦМ компоненты x и u определяются как непересекающиеся наборы из множества переменных модели:

$$x, u \in P, \quad x \cap u = \emptyset \quad (23)$$

Значения критерия k являются производными от значений x и u :

$$f : x, u \Rightarrow k, \quad (24)$$

где f – программно-реализованное правило вычисления значения критерия.

Оно, как правило, не следует из документации разработчика, а вводится в состав ЦМ при назначении критерия.

Множество задач, которые могут быть решены на базе ЦМ организации, определяется совокупностью всех возможных вариантов принадлежности переменных модели к той или иной компоненте (x или u) постановок задач.

Среди них выделяется постановка задачи, называемой далее базовой. Она учитывает специфику ЦМ и характеризуется тем, что в ней одна определенная часть

переменных модели всегда присутствует в постановках задач в составе требований (x), а другая – в составе искомого решения (u). Примером переменных базовой задачи выступают требования заказчика к поставляемой организацией продукции: тип и количество заказываемой продукции, сроки поставки, стоимость продукции и т.д.

Специфика ЦМ, влияющая на определение базовой модели, следует из ограниченных возможностей ЦМ. Эти возможности состоят из выполнения единственной функции, определяемой как выполнение тройки отображений F_1 , G , F_2 , а именно: зная состояние организации в момент $T(\gamma)$, можно определить её состояние в момент $T(\gamma + 1)$. Последовательные выполнения этой функции позволяют построить «траекторию» изменения состояния организации. Построение таких траекторий составляет возможности ЦМ организаций, а решению задачи на базе ЦМ соответствует построение конкретной траектории.

Согласно названной специфике ЦМ, для построения траектории изменения состояния организации должны быть заданы левая и правая границы траектории. Левая граница определяется точкой, которая соответствует состоянию организации в начальный момент времени, обозначаемый далее $T(1)$. Правая граница определяется косвенно: как состояние организации, соответствующее некоторому заранее заданному условию. В базовой задаче таким условием является присутствие заказанной продукции в составе ресурсов организации, т.е. выполнение заказа. Эта пара определяет следующие переменные модели, которые присутствуют в постановке каждой задачи, решаемой на базе ЦМ, как исходные данные:

- $N(I, T(1))$ - количество ресурсов, которыми располагает организация, или иначе, состояние организации, в момент начала выполнения заказа;
- $N(Z)$ – заказ, определенный как набор продукции Z (где $Z \in I$) и их количество $N(I, T(e))$, которые должны быть изготовлены в изначально не определенный момент времени $T(e)$:

$$N(Z) \in N(I, T(e)) \quad (25)$$

В основу определения искомых переменных (u) базовой задачи также положим её представление как построение траектории изменения состояния организации, границы которой закреплены названными выше исходными данными. Сама траектория, согласно изложенному ранее, определяется наборами допустимых работ $\{y^*(T(\gamma))\}$, которые последовательно передаются на выполнение в моменты $T(\gamma)$, где $\gamma=1,2,\dots,e-1$, пока не выполнится условие (25). Определение такого набора составляет суть искомого решения u :

$$u = \{y^*(T(\gamma))\}, \gamma = 1, 2, \dots, e - 1. \quad (26)$$

В общем случае возможно несколько последовательностей наборов работ (траекторий изменения состава организации), удовлетворяющих условию (25). Прономеруем их числами натурального ряда. Каждая из них определяет момент времени $T(e)$, при котором это условие выполняется, т.е. $T(e(u(i)))$, $i = 1, 2, \dots, k(u)$ - время завершения выполнения заказа, где $k(u)$ – количество вариантов его выполнения.

В итоге базовая задача, решаемая на базе ЦМ организации, может быть сформулирована в следующем виде: определить последовательность работ, при которой достигается минимум времени на выполнение заказа. Тогда тройка (u, x, k) , определяющая постановку базовой задачи, представляет собой:

- $x = \{N(I, T(1)), q(I, j), h(I, j), N(Z)\}$,
- $u = \{y^*(T(\gamma))\}, \gamma = 1, 2, \dots, e - 1$,
- $k = T(e(u(i))) - T(1)$,

а искомое решение определяется условием:

$$\bar{u} = \arg \min_{u(i)} (T(e(u(i))) - T(1)) \quad (27)$$

Представленная базовая задача является хорошо известной задачей календарного планирования [7]. Причем на базе этой же ЦМ организации могут быть решены задачи календарного планирования с ограничениями, дополнительными к базовым. Например, с заданием значений отдельных переменных в заданные

моменты времени, что на практике соответствует требованию наличия в составе организации запасов названных ресурсов в заданные моменты времени.

При реализации ЦМ организации в среде ERP-системы значения переменных в каждый момент временной шкалы могут «обновляться» не расчетным путем по отображению (14), а путем присвоения им фактических значений из ERP-системы при подтверждении в этой системе фактов выполнения работ (получения продукции). В этом случае ЦМ трансформируется в цифрового двойника (ЦД) организации и становится компонентой её системы оперативного управления (диспетчеризации). В этой системе вектором управления является набор индексов работ, передаваемых на выполнение в каждый момент $T(\gamma)$. Он формируется как результат решения базовой задачи при изменяемых на каждом очередном шаге начальных данных.

Еще одним представительным классом задач, которые могут быть решены на базе ЦМ, являются задачи оптимизации ресурсов организаций. В этом случае в состав искомым переменных u переносятся переменные из x , которые соответствуют оптимизируемым ресурсам организации. Процесс варьирования этими переменными может рассматриваться как внешний по отношению к базовой задаче.

6. Обсуждение результатов

Не смотря на активное применение цифровых двойников, в том числе в отечественной промышленности [8], исследователи сходятся во мнении, что на сегодняшний день существуют пробелы в стандартизации цифровой трансформации предприятий машиностроения [9], отсутствуют отраслевые стандарты по созданию моделей цифровых предприятий и универсальная методология создания цифровых двойников [8, 10, 11], и приводят собственные методологии построения цифровых двойников. В [11] рассматриваются понятия и взаимосвязь цифрового завода, киберфизической, цифровой, умной и виртуальной фабрики, также приводится концептуальная модель создания и функционирования цифрового завода производственного предприятия аэрокосмической отрасли.

Основное отличие предлагаемой в данной работе ЦМ заключается в том, что ЦМ предприятия строится на основе формализованной информации, описывающей

процессы предприятия согласно КТД и ЭРД. И так как нормативная документация предприятия содержит информацию о различных видах деятельности организации, то ЦМ, построенная на ее основе, содержит информацию о производственных, логистических, финансовых и других процессах, что позволяет говорить о создании единой информационной платформы (ЕИП), преимущества которой описаны в [12] и которая применительно к наукоемкой продукции позволяет реализовать элементы технологии интегрированной логистической поддержки, заявленных в [13], в едином комплексе. Границы ЦМ, реализуемой в ЕИП, определяются требованиями, которые организация возлагает на цифровую систему [14]. В общем случае такие границы определяются требованиями разработчика и изготовителя к производственной системе, т.е. требованиями, изложенными в регламентирующей документации, в частности, в КТД и ЭРД.

В результате предлагаемая ЦМ позволяет накапливать и анализировать информацию о различных аспектах деятельности моделируемого предприятия, что существенно расширяет возможности предприятия по предиктивному управлению [15]. В перспективе такой ЦД может быть доведен до состояния адаптивного и интеллектуального ЦД [16].

Преимущество предлагаемой ЦМ заключается в том, что использование регламентирующей документации как основы модели позволяет обеспечить адекватность моделируемых и реальных процессов организации. Для оценки степени достоверности и полноты такой ЦМ при рассмотрении конкретной промышленной организации как объекта управления может быть применен метод, описанный в [17].

В качестве инструмента реализации ЦМ промышленного предприятия аэрокосмической отрасли в данной работе предлагается использовать ERP-системы [18]. Применение систем данного класса позволяет накопить данные о степени выполнения производственной программы всего предприятия и его подразделений. В дальнейшем такая накопленная формализованная информация может использоваться в качестве внешней базы знаний для сторонних автоматизированных систем [19, 20], использующих современные математические методы анализа информации, с

последующей передачей результатов этого анализа в ERP систему для оперативной поддержки принятия решений.

Заключение

Основным результатом исследования является методика построения цифровой модели организации. В основе предлагаемой модели лежит представление организации как системы ресурсов, которыми обладает организация или которыми может себя обеспечить.

В качестве источника информации, используемой для построения цифровой модели промышленной организации, в статье предложено использование нормативной документации, утвержденной по результатам прохождения организацией этапа постановки на производство. Это позволяет гарантировать адекватность цифровой модели и организации, как объекта моделирования, так как они строятся на основе одной и той же информации.

В качестве среды реализации цифровой модели предлагается использование систем класса ERP, как систем, предназначенных для управления ресурсами предприятия.

Полученные результаты могут использоваться для построения цифровых моделей конкретных промышленных организаций. Цифровые двойники, построенные на базе таких моделей, позволят решать задачи планирования, управления и оптимизации ресурсов этих организаций.

Список источников

1. Акулич И.Л. Математическое программирование в примерах и задачах. - Санкт-Петербург: Лань, 2022. - 352 с.
2. NEOS Server for Optimization. URL: <https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>
3. Набатов А.Н., Веденяпин И.Э., Мухтаров А.Р. Применение онтологического подхода к процессу проектирования информационной системы // Труды МАИ. 2018. № 102. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=99177>
4. Liao Y., Deschamps F., Loures E. de F.R., Ramos L.F.P. Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal // International

Journal of Production Research. 2017. Vol. 55 (12), P. 3609–3629. DOI: [10.1080/00207543.2017.1308576](https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576)

5. Смирнов О.Л., Падалко С.Н., Пиявский С.А. САПР: формирование и функционирование проектных модулей. - М.: Машиностроение, 1987. - 272 с.
6. Григорьев А.А., Титов В.А. Характеристика, структура, организация систем управления ERP, ERP II и ERP III // Фундаментальные исследования. 2017. № 2. С. 48-51.
7. Pinedo M.L. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. Prentice Hall, New York, NY. 2008. DOI: [10.1007/978-0-387-78935-4](https://doi.org/10.1007/978-0-387-78935-4)
8. Царев М.В., Андреев Ю.С. Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 7. С. 517-531.
9. Петров А.Н., Судов Е.В., Иванов А.В., Ушаков Е.Ю. Стандартизация поддержки жизненного цикла изделий в цифровой экономике // Стандарты и качество. 2024. № 12. С. 22-27. DOI: [10.35400/0038-9692-2024-12-205-24](https://doi.org/10.35400/0038-9692-2024-12-205-24)
10. Коновалова Г.И. Концептуальные и методологические основы цифровой трансформации машиностроительного предприятия // Организатор производства. 2023. Т. 31. № 1. С. 159-170. DOI: [10.36622/VSTU.2023.56.17.012](https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.56.17.012)
11. Ткаченко И.С., Антипов Д.В., Куприянов А.В., Смелов В.Г., Кокарева В.В. Концептуальная модель цифрового завода производственного предприятия аэрокосмической отрасли // Известия Самарского научного центра РАН. 2023. № 3 (113). С. 90-106.
12. Хитрова Т.И., Хитрова Е.М., Пешкова О.В. Технологические аспекты концепции формирования единого информационного пространства современного предприятия // Известия Байкальского государственного университета. 2023. Т. 33. № 4. С. 735–743. DOI: [10.17150/2500-2759.2023.33\(4\).735-743](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2023.33(4).735-743)
13. Судов Е.В., Петров А.Н., Петров А.В., Осяев А.Т., Серебрянский С.А. Технологии интегрированной логистической поддержки в процессах жизненного цикла авиационной техники. - М.: Эдитус, 2018. - 174 с.

14. Петров Д.Ю. Архитектура информационной системы управления жизненным циклом цифрового двойника для непрерывного производства // Известия СПбГТИ (ТУ). 2021. № 57. С. 98-104.
15. Пономарев К.С., Феофанов А.Н., Гришина Т.Г. Цифровой двойник производства - средство цифровизации деятельности организации // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2019. № 2 (4). С. 11-17.
16. Цымбал М.Р., Семичастнов А.Е., Балакин Д.А., Удалов Н.Н. Разработка цифрового двойника наземной радионавигационной системы по принципам модельно-ориентированного проектирования с помощью математической среды моделирования Engec // Труды МАИ. 2024. № 136. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=180679>
17. Минаков Е.П., Привалов А.Е., Бугайченко П.Ю. Метод оценивания характеристик цифровых моделей киберфизических систем на основе множественного регрессионного анализа результатов их применения // Труды МАИ. 2023. № 131. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=175925>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-19)
18. Самогородская М.И., Бейнар И.А., Наролина Т.С. Особенности цифровой трансформации предприятий авиакосмической отрасли // Регион: системы, экономика, управление. 2020. № 1 (48). С. 91–97.
19. Дембицкий Н.Л., Васильева Т.Ю. Экспертная система технологического процесса для единичного и мелкосерийного производства РЭА // Труды МАИ. 2006. № 24. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34082>
20. Гусев П.Ю., Гусев К.Ю. Прогнозирование выполнения производственного плана авиационного предприятия с применением нечетко-нейронной сети // Труды МАИ. 2020. № 110. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=112933>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-20](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-20)

References

1. Akulich I.L. *Matematicheskoe programmirovaniye v primerakh i zadachakh* (Mathematical programming in examples and tasks: a teaching manual). Saint-Peterburg: Lan' Publ., 2022. 352 p.
2. *NEOS Server for Optimization*. URL: <https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>
3. Nabatov A.N., Vedenyapin I.E., Mukhtarov A.R. Applying ontology approach to information system design. *Trudy MAI*. 2018. No. 102. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=99177>
4. Liao Y., Deschamps F., Loures E. de F.R., Ramos L.F.P. Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*. 2017. Vol. 55 (12), P. 3609–3629. DOI: [10.1080/00207543.2017.1308576](https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576)
5. Smirnov O.L., Padalko S.N., Piyavskii S.A. *SAPR: formirovaniye i funktsionirovaniye proektnykh modulei* (CAD: design and operation of project modules). Moscow: Mashinostroeniye Publ., 1987. 272 p.
6. Grigor'ev A.A., Titov V.A. Characteristics, structure, organization systems ERP-manadement, ERP II and ERP III. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2017. No. 2. P. 48-51. (In Russ.)
7. Pinedo M.L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. Prentice Hall, New York, NY, 2008. DOI: [10.1007/978-0-387-78935-4](https://doi.org/10.1007/978-0-387-78935-4)
8. Tsarev M.V., Andreev Yu.S. Digital Twins in Industry: History of Development, Classification, Technologies, Use Cases. *Izvestiya vuzov. Priborostroeniye*. 2021. Vol. 64, No. 7. P. 517-531. (In Russ.)
9. Petrov A.N., Sudov E.V., Ivanov A.V., Ushakov E.Yu. Standardization of product life cycle support in digital economy. *Standarty i kachestvo*. 2024. No. 12. P. 22-27. (In Russ.). DOI: [10.35400/0038-9692-2024-12-205-24](https://doi.org/10.35400/0038-9692-2024-12-205-24)
10. Konovalova G.I. Conceptual and methodological framework digital transformation machine-building enterprise. *Organizator proizvodstva*. 2023. Vol. 31, No. 1. P. 159-170. (In Russ.). DOI: [10.36622/VSTU.2023.56.17.012](https://doi.org/10.36622/VSTU.2023.56.17.012)

11. Tkachenko I.S., Antipov D.V., Kupriyanov A.V., Smelov V.G., Kokareva V.V. Conceptual model of a digital factory of an aerospace manufacturing enterprise. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2023. No. 3 (113). P. 90-106. (In Russ.)
12. Khitrova T.I., Khitrova E.M., Peshkova O.V. Technological aspects of the concept of forming a single information space of a modern enterprise. *Izvestiya Baikalskogo gosudarstvennogo universiteta*. 2023. Vol. 33, No. 4. P. 735–743. (In Russ.). DOI: [10.17150/2500-2759.2023.33\(4\).735-743](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2023.33(4).735-743)
13. Sudov E.V., Petrov A.N., Petrov A.V., Osyayev A.T., Serebryanskii S.A. *Tekhnologii integrirovannoi logisticheskoi podderzhki v protsessakh zhiznennogo tsikla aviatsionnoi tekhniki* (Integrated logistics support technologies in aircraft life cycle management). Moscow: Editus Publ., 2018. 174 p.
14. Petrov D.Yu. Architecture of the information system for life cycle management of digital twin for continuous processes. *Izvestiya SPbGTI (TU)*. 2021. No. 57. P. 98-104. (In Russ.)
15. Ponomarev K.S., Feofanov A.N., Grushina T.G. Enterprise digital twin – instrument of digitalization the activity of the organization. *Avtomatizatsiya i modelirovanie v proektirovanii i upravlenii*. 2019. No. 2 (4). P. 11-17. (In Russ.)
16. Tsymbal M.R., Semichastnov A.E., Balakin D.A., Udalov N.N. Development of a digital twin of a ground-based radio navigation system based on the principles of model-oriented design using the mathematical modeling environment Engee. *Trudy MAI*. 2024. No. 136. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=180679>
17. Minakov E.P., Privalov A.E., Bugaichenko P.YU. A method for estimating the characteristics of digital models of cyber-physical systems based on multiple regression analysis of the results of their application. *Trudy MAI*. 2023. No. 131. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=175925>. DOI: [10.34759/trd-2023-131-19](https://doi.org/10.34759/trd-2023-131-19)
18. Samogorodskaya M.I., Beinar I.A., Narolina T.S. Features of digital transformation enterprises of aerospace industry. *Region: sistemy, ekonomika, upravlenie*. 2020. No. 1 (48). P. 91–97. (In Russ.)

19. Dembitskii N.L., Vasil'eva T.Yu. The technology expert system for radio electronic equipment production. *Trudy MAI*. 2006. No. 24. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34082>
20. Gusev P.Yu., Gusev K.Yu. Prediction of production plan implementation of aviation enterprise employing a fuzzy neural network. *Trudy MAI*. 2020. No. 110. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=112933>. DOI: [10.34759/trd-2020-110-20](https://doi.org/10.34759/trd-2020-110-20)

Статья поступила в редакцию 27.12.2024

Одобрена после рецензирования 10.01.2025

Принята к публикации 25.04.2025

The article was submitted on 27.12.2024; approved after reviewing on 10.01.2025; accepted for publication on 25.04.2025