

## Разработка концепций и экспертиза инвестиционных проектов при расширении машиностроительных производств

### *Developing concepts and expertise of investment projects while expanding machine-building industries*

*Рассмотрен опыт разработки концепций и экспертизы инвестиционных проектов при расширении машиностроительных производств, в ходе выполнения которых апробированы методики параллельной разработки концепции и цифровых моделей производственных систем или моделиориентированная разработка производств. Показано решение задачи выбора рационального набора технологий изготовления заданной номенклатуры с использованием нейросетевых технологий. Достигнуто существенное сокращение сроков разработки моделей при качественном повышении достоверности оценок при экспертизе инвестиционных проектов.*

*The experience of developing concepts and appraisal of investment projects during the expansion of machine-building industries is considered, during which methods of parallel development of the concept and digital models of production systems or model-oriented development of production were tested. The solution of the problem of choosing a rational set of manufacturing technologies for a given nomenclature is shown using neural network technologies. A significant reduction in the terms of model development was achieved with a qualitative increase in the reliability of estimates during the examination of investment projects.*

**Ключевые слова:** машиностроительные производства, концепции производств, инвестиционные проекты, имитационное моделирование, цифровые двойники, модели производств, нейросетевые технологии.

**Keywords:** machinery production, production concepts, investment project, simulation, digital twins, production models, neural network technologies.



**КАБАНОВ  
АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ**

*Доцент, к.т.н., менеджер комплексных проектов, отдел операционной эффективности Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»*

ORCID: 0000-0003-1989-0499

E-mail: KabanovAA@agat-roscosmos.ru

**KABANOV  
ALEXANDER**

*Cand. Sc. (Technology), Associate Professor, Operational Efficiency Department Complex Projects Manager Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC «Organization «Agat»*



**МОХОВ МИХАИЛ ЮРЬЕВИЧ**

Главный эксперт, отдел операционной эффективности Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: MokhovMY@agat-roskosmos.ru

**МОКHOV MIKHAIL**

Operational Efficiency Department Chief Expert Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC «Organization «Agat»



**СОКОЛОВ ИЛЬЯ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**

Начальник отдела операционной эффективности Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

E-mail: MokhovMY@agat-roskosmos.ru

**SOKOLOV ILYA**

Operational Efficiency Department Chief Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC «Organization «Agat»



**ТЛИБЕКОВ АЛЕКСЕЙ ХАБИЕВИЧ**

Профессор, д.т.н., главный инженер проекта, ООО «Вебер Инжиниринг»

ORCID: 0009-0009-0556-284X

E-mail: Tlibekov@weber.ru

**TLIBEKOV ALEKSEY**

D. Sc. (Technology), professor, chief project engineer, LLC “Weber Engineering”



**ФЕДОРОВ ИЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВИЧ**

Доцент, к.т.н., главный эксперт, отдел операционной эффективности Управления стратегического планирования и операционной эффективности, АО «Организация «Агат»

ORCID: 0000-0001-6644-2838

E-mail: FedorovIA@agat-roskosmos.ru

**FEDOROV ILYA**

Cand. Sc. (Technology), Associate Professor, Operational Efficiency Department Chief Expert Strategic Planning and Operational Efficiency Directorate, JSC «Organization «Agat»

**Введение**

Особо значимые и актуальные в последнее время для предприятий машиностроения вопросы импортозамещения и увеличения объемов производства требуют новых подходов к разработке проектов расширения и модернизации производственных систем, а также экспертизы соответствующих инвестиционных проектов.

Главными факторами, дающими преимущество в этих условиях, выступают:

- скорость генерации и разработки проектных решений при существенной неопределенности программы производства (как по номенклатуре, так и по объему) и большом числе возможных альтернативных вариантов реализаций концепций производства (варианты технологий производства, варианты размещения производства, варианты инсорсинга/аутсорсинга производства и пр.);
- точность оценок (экспертизы) инвестиционных

проектов и достоверность, напрямую определяющих степень риска реализации того или иного варианта концепции.

Указанные факторы находятся в противоречии. Чем выше точность, тем больше времени требуется для проработки концепции. Во многом именно по этой причине имитационная экспертиза проектов машиностроительных производств на этапе концепции в отечественной практике распространения не получила. Опыт инжиниринговых компаний показывает, что, как правило, оценка порядка требуемых инвестиций выполняется на основе грубых расчетов и не превышает 1-2 месяца, цикл же разработки цифровых моделей производственных систем в зависимости от состояния исходных данных варьируется от 3-х до 6 месяцев.

Однако такой подход себя оправдывает тогда, когда имеется явно выраженный претендент к реализации. Когда же возможных направлений (стратегий) разработ-

ки концепций несколько, то повторное использование результатов разработки имитационной модели дает существенный выигрыш по времени при существенно большей достоверности оценки.

Кроме этого, как далее будет показано, возможна параллельная разработка модели в ходе формирования так называемой в среде инжиниринговых компаний базы данных проекта.

В ряде случаев использование предлагаемых подходов позволяет отказаться от использования методов группирования и деталей-представителей, что дает возможность более полного использования преимуществ модели ориентированного подхода при внесении большого числа изменений в проект.

### Параллельная разработка концепции и модели производства

Типовой порядок разработки модели предусматривает выполнение следующих работ:

- формирование достоверных данных о производственной системе (производственный состав изделий, технологические маршруты, продолжительность циклов производства, состав технологического оборудования, рабочих мест и производственного персонала);
- разработка, верификация и валидация имитационной модели производственной системы (цифрового двойника);
- постановка экспериментов на модели производственной системы;
- анализ результатов моделирования, выявление неэффективных этапов производства и «узких мест»;
- определение потребности в организационных и технологических решениях, поиск решений;
- разработка мероприятий по повышению эффективности, оценка их рентабельности, выбор наилучшего варианта;
- интеграция цифрового двойника в ИТ-инфраструктуру предприятия;
- создание системы поддержки принятия решения для непрерывного совершенствования процессов производства на постоянной основе.

Для организации параллельной разработки концепций и анализа цифровых двойников производств необходимо, во-первых, построить программно-аппаратную инфраструктуру управления цифровыми двойниками производств, а, во-вторых, идентифицировать и управлять самими цифровыми двойниками производств.

В состав программно-аппаратной инфраструктуры управления цифровыми двойниками производств (рис. 1) входят системы-поставщики данных, системы

преобразования данных и ключевой компонент – система управления цифровыми двойниками. Поставщиками данных являются системы промышленной автоматизации различных классов (CAD/CAPP/PLM/ERP), а системы преобразования данных – это системы, позволяющие автоматизировать процессы преобразования формы и структуры данных источников в соответствие с потребностями принимающей системы управления. Для систем поставщиков данных и преобразования данных существуют готовые решения различного уровня качества как зарубежных, так и отечественных вендоров, в то время как существующих решений для системы управления цифровыми двойниками в явном виде на сегодняшний день не существует.

Первым этапом разработки такой системы управления (см. рис. 2), верхнеуровневая архитектура которой определяется в стандарте [1], является формирование структуры процессов самого цифрового двойника в виде потоков материалов, производственных ресурсов, персонала (процессная модель цифрового двойника) и механизмов управления процессами и данными цифрового двойника (процессная модель системы управления).

Вторым этапом является формирование структуры данных, обеспечивающих онтологию цифровых двойников производств, и механизмов управления ими путем гармонизации международных и государственных стандартов (например, ISO 10303-242 и ГОСТ Р МЭК 62264-1-2014) для описания концептов производственной системы, среди которых: продукт, процесс, персонал, средства технологического оснащения, материалы, инфраструктура, условия эксплуатации [2]. Онтологическая модель предметной области позволит решить задачи интероперабельности (функциональной совместимости) приложений, использующих данные цифровых двойников производств, за счет использования в своей структуре сущностей, инвариантных контексту отдельных предприятий [3]. Эта интероперабельность будет реализована как за счет обеспечения совместимости моделей информационного обеспечения процессов различных стадий жизненного цикла (ЖЦ) продукта и производства, так и за счет обеспечения совместимости разнородных моделей информационного обеспечения в рамках одной стадии ЖЦ продукта и производства. В конечном итоге это обеспечит интеграцию с одноранговыми приложениями управления цифровыми двойниками производств и повысит интегративную эффективность – получение данных цифрового двойника из различных систем промышленной автоматизации.

На основе потребностей процессной модели использования цифрового двойника и онтологической модели производства разрабатывается схема данных системы



Рис. 1. Программно-аппаратная инфраструктура управления цифровыми двойниками производства.  
 Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

управления цифровыми двойниками. Затем она интерпретируется в реляционную модель хранения информации выбранной СУБД. При этом выделяются два класса объектов, ориентированные на различные механизмы управления их изменчивостью:

1. Неконфигурируемые объекты (немодифицируемые объекты), которые «безусловно» составляют массив данных описания производственной системы, т.е. в каждый дискретный момент существования производственной системы ей соответствует единственный массив таких объектов. Такие объекты применяются, например, для описания продуктов с единственно возможной конфигурацией, неизменных компонентов организационной структуры предприятий (цех, подразделение, производственная ячейка), персонала определенной специализации и квалификации.
2. Конфигурируемые объекты (модифицируемые объекты), которые существуют одновременно в нескольких массивах данных описания производственной системы, каждый из которых описывает одну конфигурацию производственной

системы. С конфигурируемыми объектами могут быть связаны правила их применимости в модели производственной системы (условия использования). Такими объектами, как правило, являются компоненты изделий, операции технологических процессов, производственные центры, если их вариативность рассматривать в контексте конфигурирования оснащения самого оборудования (инструментами, приспособлениями и средствами автоматизации).

Использование модификаций объектов, наряду с сохранением истории изменений, позволяет обеспечить автоматизированное конфигурирование исполняемых моделей производственной системы (например, имитационных моделей различных ее вариантов) для анализа в контексте требуемого применения цифрового двойника производства. При этом механизмы этого конфигурирования могут быть унифицированы относительно запросов в базу данных системы управления цифровыми двойниками, поскольку ее схема данных разработана на основе онтологической модели производственной системы. Для реализации этих механизмов



Рис. 2. Два этапа организации параллельной разработки концепций и анализа цифровых двойников производств.  
Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

может быть использован непроцедурный язык программирования – таблицы решения [4; 5], который позволит на основе подхода “no code” оперативно формировать базу знаний проектов цифровых двойников производства, тем самым обеспечивая непрерывное развитие как базы данных конкретного проекта, так и системы управления в целом.

На основе схемы данных системы управления цифровыми двойниками определяются требования к формату поставляемых данных из систем промышленной автоматизации, конфигурируются процедуры получения этих данных. Эти процедуры могут быть реализованы в контуре сторонних специализированных систем, интегрированных с системой управления, либо в контуре ее самой. Для реализации таких процедур в контуре самой системой управления может быть также использован непроцедурный язык программирования связанных таблиц решения. В данном случае он позволит оперативно разрабатывать интеграционные шаблоны преобразования данных для конкретной системы автоматизации предприятия.

На втором этапе – этапе идентификации и управления самими цифровыми двойниками производств – сначала определяются источники данных цифровых двойников и форматы, в которых эти данные могут быть поставлены. Полученные форматы данных служат основанием для разработки процедур процесса переноса данных из источников в базы данных проекта. С использованием этих процедур выполняется интеграция

источников данных с системой управления цифровыми двойниками производств, оценивается их формальная целостность средствами самой базы данных проекта, после чего формируются массив данных для оценки их достоверности на статической и динамической моделях производства.

Полностью валидированные данные служат основой для формирования справочника производственной системы предприятия и его текущего состояния – цифрового двойника производства.

Эта модель формируется в три этапа:

- сведения об изделиях (номенклатура и состав);
- сведения о производстве (спецификация оборудования и технологические процессы);
- сведения о маршрутных процессах изготовления изделий.

Цифровой двойник производства является базовой линией конфигурации, на основании которой с использованием справочника производственной системы предприятия разрабатываются перспективные модели производства. Для этого используются автоматизированные механизмы конфигурирования моделей из базы знаний системы управления цифровыми двойниками производств.

После анализа перспективных моделей производств полученные результаты в виде журнала имитационного эксперимента интерпретируются и заносятся в базу данных проекта для дальнейшего анализа. Процедуры анализа результатов исследования цифровых двойни-

ков могут быть также формализованы в виде связанных таблиц решений в контуре системы управления либо для этого анализа могут быть использованы сторонние системы класса “business intelligence”<sup>1</sup>, интерфейсы которых должны быть настроены на структуру хранения результатов в базе данных проекта.

В контексте основных информационных механизмов, обеспечивающих параллельную разработку моделей производств и их анализа, можно идентифицировать следующие основные преимущества использования базы данных проекта и системы управления цифровыми двойниками производств:

- управление модификациями данных, порождаемыми при внесении изменений в описание производственной системы предприятия, обеспечивает как возможность восстановления проектных данных в случае некорректно выполненных процедур, так и возможность автоматизации процессов управления конфигурациями цифровых двойников производств;
- использование в системе управления цифровыми двойниками производств классических механизмов разграничения доступа к данным проекта позволит сократить время формирования и анализа моделей производственных систем за счет организации совместной работы над проектом;
- использование непроцедурного языка программирования в виде связанных таблиц решений для формализации различных процедур управления

цифровыми двойниками позволит сократить время и затраты как на сбор и валидацию данных цифровых двойников, так и на формирование анализа моделей производств;

- накопленные со временем развития проектов формализованные процедуры позволят создать базу знаний цифровых двойников производств, которая повысит эффективность реализации проектов за счет использования готовых, апробированных решений по формированию, анализу и выбору оптимальных вариантов производственных систем.

**Оценка конфигураций производств, постановка экспериментов на моделях производств, формирование альтернативных вариантов концепций**

Используемый программный инструмент [6] предусматривает последовательную разработку и оценку модели производства, разработку динамической модели с использованием 3-х модулей программы: модуль «Редактор», модуль «Планирование», модуль «Моделирование». Схема использования ПО показана на рис. 3.

Ниже представлены алгоритмы последовательности разработки моделей для текущего (рис. 4) и целевого (рис. 5) состояний производственной системы.

Как видно из рис. 4, суть этапа разработки модели текущего состояния сводится к задаче нахождения таких значений длительностей выполнения работ, при которых результаты работы модели подтверждают исторические данные по выпуску изделий. Такая постановка в полной мере оправдана, поскольку для большинства отечественных предприятий характерны высокая степень досто-

<sup>1</sup> Business Intelligence (англ. бизнес-аналитика) - методы и инструменты, обеспечивающие перевод информации в доступную форму.

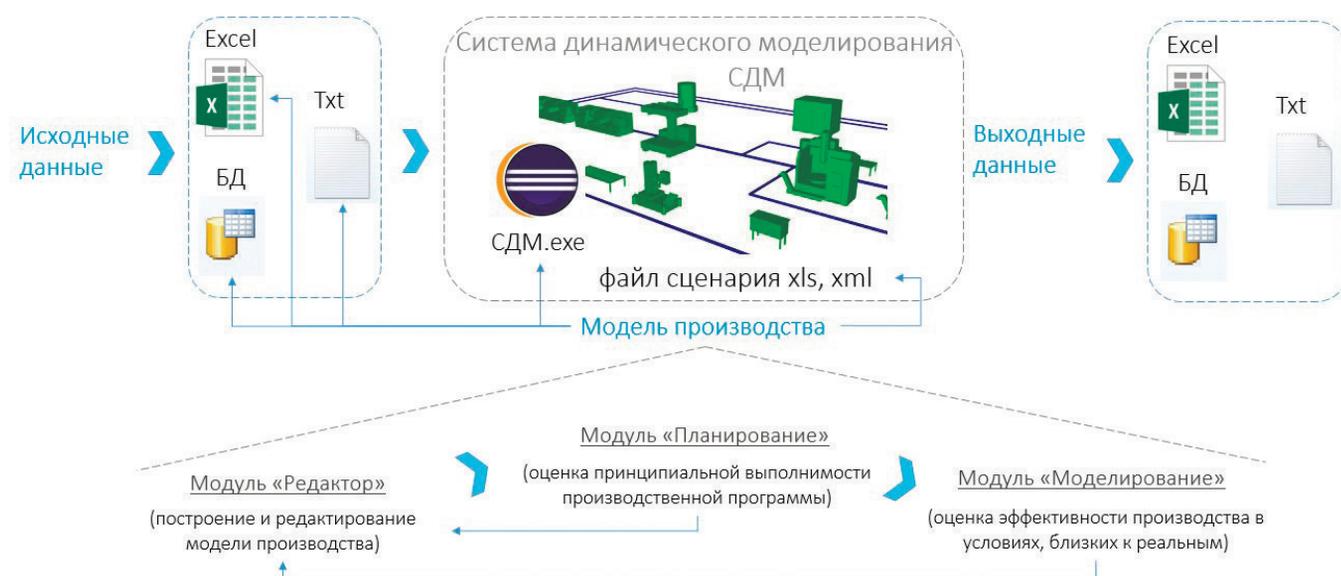


Рис. 3. Схема использования программного инструмента моделирования производственных систем. Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

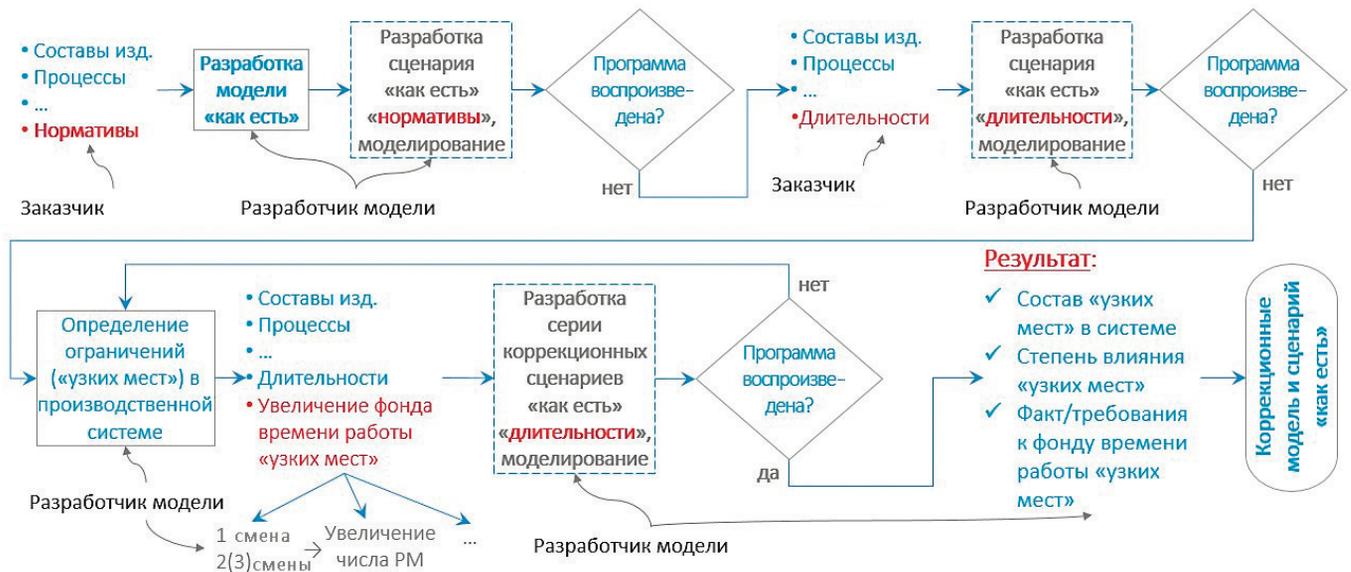


Рис. 4. Последовательность разработки моделей (текущее состояние).  
 Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

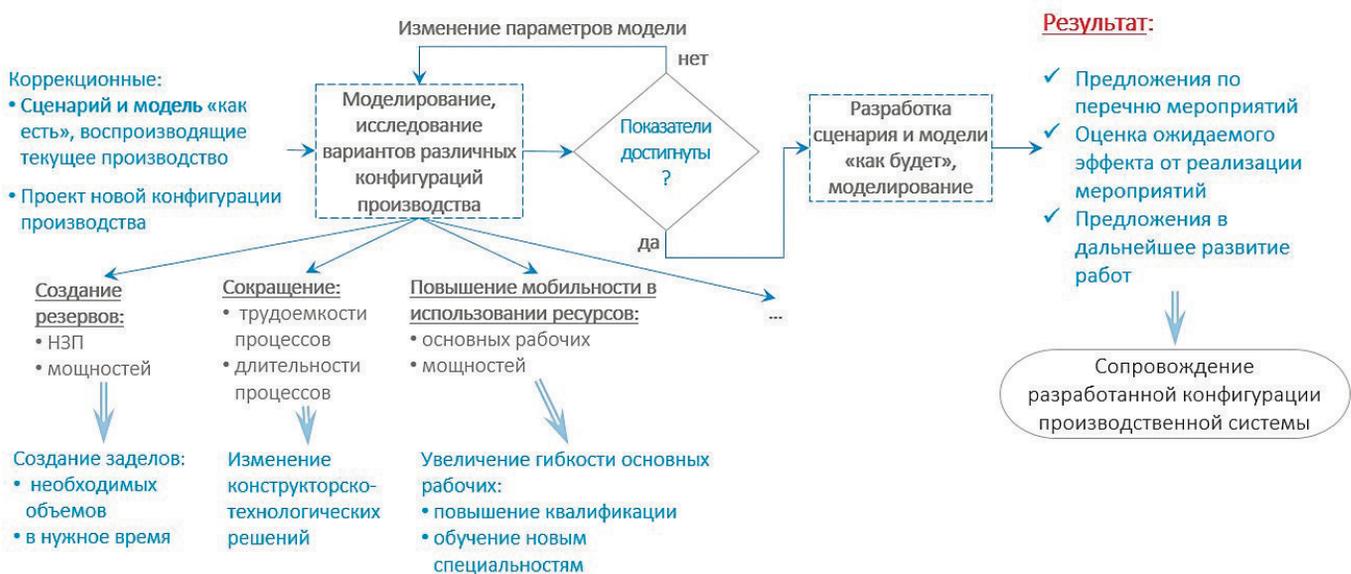


Рис. 5. Последовательность разработки моделей (целевое состояние).  
 Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

верности данных в части структуры маршрутных технологических процессов и низкое качество данных или их полное отсутствие в части значений длительностей выполнения операций. С привлечением специалистов производства, а также с использованием интеллектуальных алгоритмов такая процедура позволяет достичь быструю сходимость модели, а значит, сократить общие сроки работ, не теряя в качестве оценок.

При разработке модели целевого состояния базой служит валидированная модель текущего состояния. В проектах по модернизации или расширению производств это является ответом на часто задаваемый вопрос

«Насколько можно доверять модели?», т.к. база подтверждена опытом, а вносимые изменения в систему производства валидируются на собственных моделях, к примеру, на основе моделирования в системах класса САМ<sup>2</sup>. В этом случае качество экспертизы позволяет подтвердить не только тенденции в системе (что тоже применяется в проектах, там, где этого достаточно), но и с уверенностью опираться на полученные абсолютные значения показателей функционирования системы.

<sup>2</sup> САМ (англ. Computer-aided manufacturing) - автоматизированная система, предназначенная для подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ.

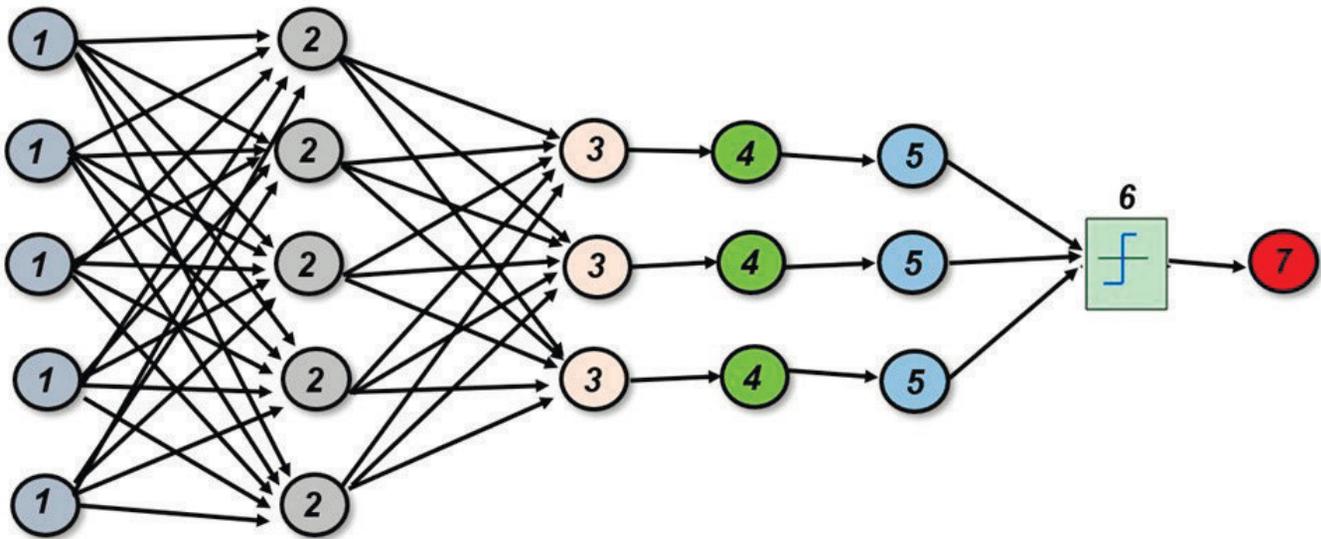


Рис. 6. Возможная архитектура нейронной сети для решения задачи выбора рационального набора технологий изготовления деталей заданной номенклатуры.

Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

№	Содержание блоков алгоритма	Структура алгоритма
1	2	3
1	Список изготавливаемых деталей, программа их производства, чертежи деталей	
2	База конструкторских (α) и технологических (β) параметров деталей	
3	Массив конкурирующих маршрутных технологических процессов	
4	Интерполяция основного времени обработки (T <sub>0</sub> ) модифицированным дробно-степенным рядом Пюизо-Ньютона	
5	База показателей маршрутных технологических процессов	
6	Функция активации: поиск оптимальных вариантов маршрутных технологических процессов	
7	Оптимальное решение	

Табл. 1. Содержание блоков и структура алгоритма работы нейронной сети для решения задачи выбора рационального набора технологий изготовления деталей заданной номенклатуры.

Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

### Проектирование альтернативных вариантов производства с использованием нейросетевых технологий

В случае проектирования производства для изготовления широкой номенклатуры деталей с большим числом альтернативных вариантов технологий изготовления проведение полного цикла имитационного моделирования для каждого из вариантов концепции становится неэффективным. Выходом является использование аппарата нейронных сетей (возможная архитектура сети для этой задачи показана на рис. 6), с помощью которого подбирается наиболее рациональный вариант набора технологий производства заданной номенклатуры. Этот вариант далее подается на вход имитационной модели для валидации.

Блоки алгоритма работы нейронной сети (табл. 1) построены по принципу гибридной, обучаемой, многослойной сети рекуррентного распространения. Рассмотрим содержание и принципы работы блоков сети на примере проектирования производства деталей из листа.

В результате анализа чертежей изготавливаемых деталей формируется база конструкторских и технологических параметров.

Конструкторские параметры ( $\alpha$ ):

- толщина листа, из которой изготовлена деталь;
- диаметр (или длина);
- ширина;
- вес детали;

Технологические параметры ( $\beta$ ):

- перспективная производственная программа (если перспективная производственная программа не известна, выполняется ее прогноз [7]);
- периметр наружного и внутренних контуров;
- количество врезок для формирования внутренних контуров детали;
- предел прочности материала при растяжении;
- количество ударов и количество смен инструмента при изготовлении деталей на координатно-револьверном прессе. В зависимости от конструкции детали эти сведения дополняются количеством формовок, отверстий с фасками и резьбовых отверстий, длиной обработки роликом;
- количество линий гибки и высота максимальной полки.

Массив конкурирующих маршрутных технологических процессов формируется из операций изготовления заготовки или готовой детали по различным технологиям: резка на гильотинных или роликовых ножницах, лазерная, гидроабразивная или плазменная резка (первые операции обработки). Последующие операции выполняются вырубкой на координатно-револьверном прессе, свободной гибкой, вырубкой из ленты или из полосы на универсальных прессах, гибкой, вытяжкой или формовкой в штампе.

Расчет основного времени обработки ( $T_o$ ) одной детали средней сложности из листа с использованием специализированных САМ систем занимает от 0,5 до 1,0 часа. Как правило, при проектировании производства выполняется анализ от сотни до нескольких тысяч деталей. Поэтому выбирают детали-представители, для которых точно известно основное время обработки на разном оборудовании. Для расчета времени обработки остальных деталей ООО «Вебер Инжиниринг» разработан метод интерполяции модифицированным дробно-степенным рядом Пюизо-Ньютона по генетическому алгоритму. Это значительно сокращает время проектирования производства и обеспечивает допустимую точность проектирования. Например, для интерполяции времени штамповки на координатно-револьверном прессе из всей номенклатуры деталей выбрано 18% деталей-представителей, для изготовления методом свободной гибки 17%, а для резки лазером 2,5% (табл. 2).

При этом погрешность интерполяции и расчета времени обработки для остальных деталей не превысила 6%. Если использовать для интерполяции большую выборку из генеральной совокупности деталей, можно значительно повысить точность проектирования.

Зная основное время, можно сформировать базу показателей маршрутных технологических процессов, которую составляют подготовительно-заключительное время ( $T_{пз}$ ), оптимальная партия обработки ( $N_{opt}$ ), вспомогательное время ( $T^в$ ), станкочемкость ( $S$ ), количество ( $C_i$ ), коэффициенты загрузки ( $K_z$ ) и использования ( $K_{и}$ ) оборудования [7].

Практически каждую деталь из листа можно изготовить по различным технологическим маршрутам.

Технологический процесс	Количество деталей	Количество деталей-представителей	Максимальная погрешность интерполяции, %
Штамповка на координатно-револьверном прессе	38	7	3,42
Свободная гибка	23	4	-0,53
Резка лазером	594	15	-5,62

Табл. 2. Результаты оценки точности аппроксимации.  
Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

В результате работы алгоритма для одной детали разрабатывается несколько вариантов маршрутных технологических процессов с различными показателями (критериями эффективности). Выбор варианта, который будет предложен к реализации, осуществляется решением задачи оптимизации.

В условиях, когда оптимальный вариант (функция цели  $Z$ ) должен быть найден в результате анализа нескольких критериев эффективности, т.е. функция цели многокритериальная, используют метод «свертки». Общим недостатком известных методов «свертки» является то, что низкая эффективность одних критериев скрывается за высокой эффективностью других. В результате решение задачи оптимизации не соответствует эффективному варианту. Специалистами ООО «Вебер Инжиниринг» опробован метод, обеспечивающий «свертку» критериев к косинусу угла в многомерном векторном пространстве [8]. Метод обеспечивает поиск оптимальных значений группы критериев, которые соответствуют эффективному варианту маршрутной технологии.

Важное преимущество – возможность постоянно пополнять базы данных, содержащие проверенные практикой операционные технологические процессы и реальное время обработки. В результате, когда наберется достаточное количество информации, можно рассчитывать время изготовления детали без необходимости использовать интерполяцию, а зная только косвенные признаки конструкции детали из листа: периметр резания, толщину и материал листа, количество врезок, количество линий гибки, величину полок и др.

По мере использования методики у предприятия

накапливается собственная база основных технологических решений. Используя эту базу при модернизации существующего или разработке нового производства, можно подобрать несколько проектов для изготовления близкой по назначению продукции. При принятии решения о модернизации производства нужно определить ориентировочный диапазон инвестиций, сроки окупаемости, требуемые производственные площади и другую информацию, основанную на результатах ранее выполненных проектов.

### Опыт разработки концепций и экспертизы инвестиционных проектов при расширении машиностроительных производств

В рамках решения задачи импортозамещения и увеличения объемов производства инжиниринговой компанией ООО «Вебер инжиниринг» в партнерстве с АО «Организация «Агат» в части имитационной экспертизы решений выполнен проект по разработке концепции перспективной конфигурации планируемого производства и произведена оценка необходимых для его реализации инвестиций.

Цифровая модель производства (см. рис. 7) создавалась для управления разработкой проектных решений по целевой конфигурации производства изделий путем их оценки на динамической модели производства для заданных производственной программы и условий производства.

В задачи разработки, укрупненно, входила разработка двух моделей:

- модели текущего производства изделий;
- модели целевого производства (проектная конфи-



Рис. 7. Цифровая модель одного из вариантов разработанной концепции производства.  
Источник: разработано авторами на основании собственных исследований

гурация) изделий.

Модель текущего производства изделий была предназначена для выполнения следующих процедур:

- отработки вопросов по созданию модели, отвечающей целям проекта (данные, ограничения, допущения др.);
- получения оснований валидности модели проектной конфигурации на основе сравнительной оценки показателей с моделью текущей конфигурации;
- получения оценок эффективности производства в сравнении с текущим его состоянием.

На модели целевого производства (проектная конфигурация) изделий проводилась оценка проектных решений по конфигурации производства и отрабатывались алгоритмы управления производством (в перспективе) при внедрении систем класса APS<sup>3</sup> или MES<sup>4</sup>.

Для разработанной модели текущей конфигурации производства было выполнено исследование производственной системы по следующим параметрам:

- пропускная способность;
- производительность;
- циклы выполнения заказов;
- загрузка производственных центров (оборудования, рабочих мест);
- уровень незавершенного производства.

На модели целевой конфигурации производства выполнялась отработка решений по структуре системы и проверка предлагаемых вариантов по конфигурации производства с контролем по параметрам:

- пропускная способность;
- производительность;
- циклы выполнения заказов;
- определение необходимого количества производственных центров (оборудования, рабочих мест);
- загрузка производственных центров (оборудования, рабочих мест);
- уровень незавершенного производства.

На этапе реализации концепции производства планируется использование разработанных моделей для решения следующих задач:

- моделирование плана перехода от текущей конфигурации к целевой;
- проверка функционирования на этапах внедрения;
- управление и оценка пропускной способности;
- контроль производительности;

- управление и контроль циклов выполнения заказов;
- оценка загрузки производственных центров (оборудования, рабочих мест);
- оценка уровня незавершенного производства.

Полный цикл разработки модели для концепции нового производства размерностью более 150 тысяч детали-операций была выполнена в рекордно сжатые сроки – 2 месяца, включая этапы сбора, верификации и валидации исходных данных, разработки модели, постановки экспериментов и корректировки. Для сравнения, как правило, для подобной задачи только на подготовку исходной информации уходит не менее 3-х месяцев.

#### Анализ результатов

Как уже указывалось, эффекта по скорости и качеству разработки модели удалось достигнуть за счет параллельной схемы работ с самого старта проекта. При этом сбор данных, по сути, управлялся процессом создания модели: какие данные в первую очередь, какие данные требуют уточнения, какова детализация сбора данных – эти и другие вопросы решались на основе модели ориентированного подхода, исходя из целей проекта и принятых ограничений модели.

Особо следует отметить согласованную и оперативную работу участников проекта, без которой никакой метод не даст должного результата. Конфигурация производственной системы трансформировалась по несколько раз. При этом каждый раз выполнялся имитационный эксперимент («прогон модели»), после чего по найденным проблемным участкам и компонентам изделий специалистами-технологами разрабатывались новые технологические процессы, производилась соответствующая коррекция модели производства и снова запускался прогон модели. Зачастую каждая такая трансформация конфигурации производственной системы выполнялась в течение одного рабочего дня. Там, где было ясно, что реализация запланированного объема работ затягивается или может затянуться на неопределенное время – менялся подход и находились альтернативные способы решения частных задач.

По результатам выполнения работ проекта остро встала необходимость разработки платформенного решения, позволяющего обеспечить как параллельную организацию работ сразу несколькими инженерами различной специализации над проектами цифровых двойников производств, так и синхронизацию полученных результатов исследований модели производственной системы предприятия.

<sup>3</sup>APS (Advanced Planning & Scheduling) - система планирования производства и оптимизации производственных планов для нескольких производственных подразделений.

<sup>4</sup>MES (Manufacturing Execution System) - система производственного планирования и диспетчеризации процессами производственного подразделения.

**Заключение**

Разработка концепций и экспертиза инвестиционных проектов при расширении машиностроительных производств в последнее время имеют не только особую актуальность и значимость, но и характеризуются специфическими условиями реализации. Зачастую сжатые

сроки вынуждают отказываться от глубокого анализа в пользу быстрых решений. В работе показаны подходы и результаты их апробации, позволяющие существенно сократить сроки обоснованной высококачественной экспертизы решений с применением современных технологий по анализу данных и моделированию систем.

**Список литературы**

1. International Organization for Standardization. ISO 23247 «Digital Twin Framework for Manufacturing». (2021). URL <https://www.iso.org/standard/75066.html>. (дата обращения 10.08.2023 г.).
2. ГОСТ Р МЭК 62264-1-2014. Интеграция систем управления предприятием. М: Стандартинформ, 2016. 68 с.
3. Кабанов А.А., Федоров И.А. Архитектура системы управления цифровыми двойниками производств как основа интеграции различных моделей их представлений // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2023. №82. С. 162-176.
4. Еремеев А.П. Продукционная модель представления знаний на базе языка таблиц решений. // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика, 1987. – № 2. – С. 196–209.
5. Федоров И.А. Процесс создания автоматизированной системы с использованием аппарата таблиц решений // Труды МАИ. 2012. № 53. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29733> (дата обращения 01.08.2023 г.)
6. Кабанов А.А., Мохов М.Ю., Федоров И.А. Цифровое моделирование и имитирование систем аэрокосмического производства с целью управления операционной эффективностью // Экономика космоса – 2022. – №1 – с. 57-68.
7. Тлибеков А. Х. Методика проектирования нового производства деталей из листа. // Ремонт. Инновации. Технологии. Модернизация/ № 4. 2015. С. 80–82.
8. Тлибеков А.Х. Оптимизация параметров механических систем. Актуальные вопросы современного естествознания. Межрегиональный сборник научных трудов – Нальчик: Каб.-Балк. ун-т., 2003. С. 101 – 105.

**List of literature**

1. International Organization for Standardization. ISO 23247 Digital twin system for manufacturing. (2021). URL <https://www.iso.org/standard/75066.html>. (accessed 10.08.2023 г.)
2. GOST R IEC 62264-1-2014. Integration of enterprise management systems. M: Standartinform, 2016. 68 p.
3. Kabanov A.A., Fedorov I.A. Architecture of the control system for digital dual production as the basis for managers of various models of their representations // Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University. 2023. No. 82. pp. 162-176.
4. Eremeev A.P. Production model of knowledge representation based on the language of tabular solutions. // Izv. Academy of Sciences of the USSR. Technical cybernetics, 1987. – No. 2. – P. 196–209.
5. Fedorov I.A. The process of creating an automated system using the apparatus of decision tables // Proceedings of MAI. 2012. No. 53. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=29733> (accessed 01.08.2023 г.)
6. Kabanov A.A., Mokhov MY, Fedorov I.A. Digital modeling and simulation of aerospace manufacturing systems to manage operational efficiency // Space economics – 2022. №1 – p. 57-68.
7. Tlibekov A.Kh. The methodology of designing a new production of sheet parts // RHYTHM of machinery – 2015. №4 – p. 80-82.
8. Tlibekov A.Kh. Optimization of parameters of mechanical systems. Current issues of modern natural science. Interregional collection of scientific works – Nalchik: Kab.-Balk. Univ., 2003. pp. 101 – 105.

Рукопись получена: 07.09.2023

Рукопись одобрена: 22.09.2023