

УДК 004

DOI 10.21661/r-114691

Д.Р. Насибуллин, Д.И. Токарева, С.Г. Селиванов

**ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЛАНИРОВОК
ОБОРУДОВАНИЯ В ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТАХ
ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРЕВООРУЖЕНИЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО
ПРОИЗВОДСТВА**

Аннотация: данная статья рассматривает пути совершенствования автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП). Для АСТПП был разработан метод оптимизации технологических планировок оборудования на основе использования искусственных нейронных сетей.

Ключевые слова: техническое перевооружение, искусственные нейронные сети, инновационные проекты, реконструкция производства, производственная программа, кластеризация изделий, оптимизация, проектные технологические процессы, сети LVQ, сеть Джордана, сеть Элмана, нечеткая логика.

D.R. Nasibullin, D.I. Tokareva, S.G. Selivanov

**OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL PLANNING OF THE
EQUIPMENT IN INNOVATIVE PROJECT OF MODERNIZATION OF
MACHINE-BUILDING PRODUCTION**

Abstract: this article describes the ways to improve the automated system of technological preparation of manufacturing. The method for optimizing the planning of technological equipment based on the use of artificial neural networks was developed for the automated system of technological preparation of manufacturing.

Keywords: modernization, artificial neural networks, innovative projects, reconstruction of production, production plan, clustering products, optimization, design processes, LVQ network, Jordan network, Elman network, fuzzy logic.

Введение

В данной публикации рассмотрены методы оптимизации технологических планировок оборудования в инновационных проектах реконструкции и технического перевооружения производства.

Целью данной публикации является разработка метода оптимизации парка технологического оборудования при разработке проектной технологической документации в ходе технического перевооружения производственных корпусов, цехов и участков машиностроительных предприятий. Решение данной задачи осуществляется на основе применения методов искусственного интеллекта.

Разработанный метод оптимизации технологических планировок оборудования обеспечивает совершенствование автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП) путем решения задач структурной оптимизации парка технологического оборудования и размещения оборудования производственного корпуса, цеха или производственного участка.

1. Автоматизация технологического проектирования в проектах реконструкции и технического перевооружения производства

В практике организации работ по технической реконструкции приняты два основных способа выполнения разработок, согласования и утверждения проектной документации и выполнения на их основе строительно-монтажных и пусконаладочных работ: подрядный и хозяйственный. На рис.1 приведена информационно-функциональная схема разработки технологической части таких проектов.

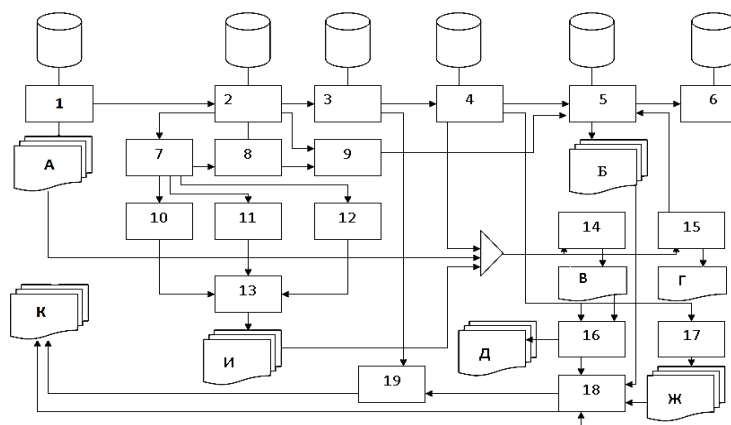


Рис. 1. Схема автоматизации технологического проектирования реконструкции и технического перевооружения цехов

На приведенной информационно-функциональной схеме (рис.1) приняты следующие условные обозначения процессов:

- 1 – разработка производственной программы;
- 2 – выбор организационных форм производства;
- 3 – разработка нормативных (перспективных) показателей и анализ цехов-аналогов;
- 4 – разработка норм технологического проектирования;
- 5 – расчет необходимого количества оборудования;
- 6 – расчет потребных энергоресурсов;
- 7 – выбор форм организации основного производства и технологических процессов;
- 8 – выбор форм организации управления;
- 9 – выбор форм организации вспомогательного производства;
- 10 – выбор и разработка типовых (групповых, модульных) технологических процессов;
- 11 – выбор и проектирование директивных технологических процессов;
- 12 – выбор проектных и разработка перспективных технологических процессов;
- 13 – разработка комплектов технологической документации;
- 14 – расчет трудоемкости;
- 15 – расчет станкоемкости;
- 16 – расчет численности работающих;
- 17 – расчет площадей;
- 18 – разработка технологических компоновок и планировок оборудования;
- 19 – расчет и анализ технико-экономических показателей.

В условиях технической реконструкции (модернизации, реновации, реконструкции, технического перевооружения, комплексной автоматизации, инновационной конверсии, конверсии оборонного производства) технологическая часть проекта является центральным разделом, который обеспечивает экономическую и коммерческую эффективность инвестиций, ориентированных на обеспечение выпуска новой (инновационной) продукции.

В случае разработки проектов технического перевооружения производства центр тяжести работ, как правило, должен смещаться из сферы строительного проектирования в область технологического проектирования. В этой связи требуется научно-методическое обеспечение таких разработок средствами системно-технического технологического проектирования, обеспечивающего автоматизацию проектно-технологических работ в целях не только максимального сокращения длительности цикла технической подготовки производства, но и повышения качества и эффективности проектных разработок.

По результатам выполнения рассмотренных процессов (рис. 1) разрабатывают техническую документацию, основные комплекты которой обозначены на рис. 1 следующими символами:

- А – ведомости производственной программы;
- Б – ведомости и спецификации оборудования;
- В – ведомости трудоемкости;
- Г – ведомости станкоемкости (или сводный документ, объединенный с ведомостью трудоемкости);
- Д – ведомости состава рабочих (работающих);
- Ж – ведомости и экспликации площадей;
- И – комплекты документации технологических процессов;
- К – комплект документов технологической части проекта реконструкции и/или технического перевооружения.

Кроме подрядного способа в практике организации работ по реконструкции и техническому перевооружению действующего производства без его остановки применяют так называемый «хозяйственный способ» организации работ.

Хозяйственный способ отличается от подрядного способа реорганизация менее сложных объектов, например, реконструкция отдельных цехов или техническое перевооружение производственных участков. Техническая реконструкция (модернизация) данных объектов должна быть увязана в систему работ, нацеленную на улучшение конечных результатов деятельности предприятия [1], что, как показывает практика, позволяет удваивать объемы выпуска изделий (инновационной продукции) на тех же площадях и при той же численности работающих.

2. Особенности разработки инновационных проектов технического перевооружения цехов и участков машиностроительных предприятий

Техническое перевооружение производства, как правило, осуществляют в целях постановки на производство новых изделий (инновационной продукции). Оно предполагает коренной пересмотр технологических процессов на основе разработки проектных, перспективных и директивных технологических процессов. Такие комплекты технологической документации предусматривают применение новых более прогрессивных методов обработки (высоких и критических технологий) и новых средств технологического оснащения, улучшение заготовок, внедрение нового высокоавтоматизированного оборудования, прогрессивной технологической оснастки, многоинструментальных наладок, промышленных роботов, прогрессивных методов и режимов обработки и других инноваций.

Для унификации базовых, проектных (перспективных) технологических процессов, обеспечения гибкости производства, возможностей быстрой смены объектов производства проекты технического перевооружения могут также предусматривать:

- разработку типовых, групповых и модульных технологических процессов;
- использование мехатронного оборудования и другого оборудования с числовым программным управлением, гибких производственных модулей, роботизированных технологических комплексов, прогрессивного агрегатного оборудования и другого переналаживаемого технологического оборудования и переналаживаемой технологической оснастки;
- применение концепций «умного производства» и «цифрового производства» для использования средств искусственного интеллекта и возможностей преобразования цифрового дизайна в материальные объекты.

Комплексное применение таких мероприятий в инновационных проектах технического перевооружения машиностроительного производства обеспечивает улучшение большинства технико-экономических показателей. Сказанное можно проследить на примере трендов роста производительности труда и/или снижения трудоемкости, рис. 2 и табл. 1.

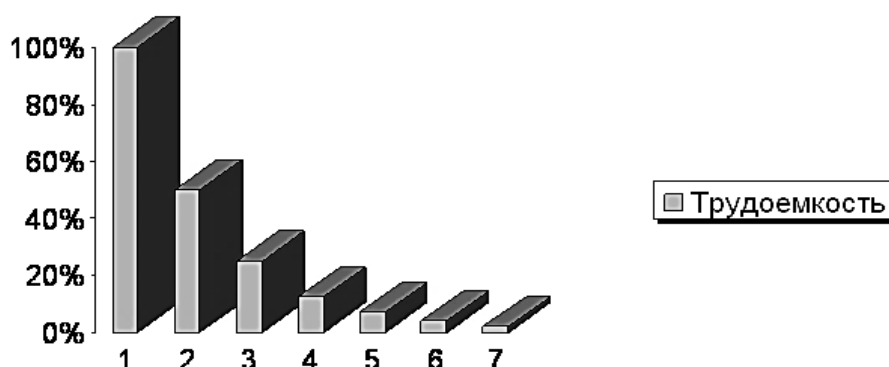


Рис. 2. Тенденции снижения трудоемкости изготовления изделий в проектах технического перевооружения производственных участков: условные обозначения 1–7 приведены в табл. 1

Функции, выполняемые САПР технологических планировок в проектах технического перевооружения производства и/или АСТПП (автоматизированных систем технологической подготовки производства) обычно следующие:

- построение изображения строительных элементов здания;
- выбор и размещение пользователем моделей технологического оборудования при выполнении норм технологического проектирования за счет использования различных темплетов (масштабированных ортогональных проекций) или объемных макетов оборудования;
- выбор и размещение пользователем на чертеже технологической планировки оборудования моделей подъемно-транспортных средств (в том числе объемных макетов в виртуальном пространстве);
- организация диалоговой разработки чертежей технологических планировок оборудования (вставка любого элемента сопровождается диалогом ЭВМ с пользователем), в процессе которой можно изменить габаритные параметры моделей и (или) их атрибуты;
- автоматическая разработка спецификации используемых станков (оборудования) к чертежу разработанной технологической планировки производственного подразделения;
- обеспечение вывода подготовленного чертежа на твердый носитель при помощи принтера в необходимом масштабе;

– использование существующих планировок: в качестве прототипов, например, при техническом перевооружении участка (в качестве фрагментов при создании технологических планировок, например, при проектировании планировки цеха из разработанных планов расположения оборудования входящих в него производственных участков).

Таблица 1

Основные формы компоновки (планировки) производственных участков
в проектах технического перевооружения производства

<i>Форма организации</i>	<i>Основные компоновки производственных участков</i>	
А) Участки с технологической формой специализации	1	– токарные, фрезерные, расточные, прессы; – слесарные; – электрохимической обработки; – моечные, консервации (расконсервации) и т. п.
Б) Участки группового производства	2	– с групповым расположением оборудования; – с «цепным» расположением оборудования; – многономенклатурные «групповые поточные линии».
	3	– роботизированные производственные участки; – гибкие производственные системы; – участки интегрированного производства (СІМ) и интеллектуального («умного») производства.
В) Участки поточного производства	4	– поточные линии с групповыми операциями.
	5	– прерывные поточные линии с распределительными конвейерами; – непрерывные поточные линии с рабочими конвейерами; – поточные линии с пульсирующими конвейерами; – бесконвейрные поточные линии; – стационарные потоки.
	6	– автоматические поточные линии. – роторные и роторно-конвейерные комплексы;
Г) Участки с подетальной специализацией рабочих мест	7	– автоматные участки.



Рис. 3. Технологическая планировка оборудования участка гибкой производственной системы (пример первой из четырех линий станков)

Чертеж планировки оборудования в проекте (рис. 3) наряду с трехмерной моделью участка, цеха или корпуса предприятия (Autodesk Factory Design Suite – для разработки архитектурно-строительной части проекта и встраивания в нее технологической части проекта [2]) (рис. 4) является ответственным документом, так как на его основе осуществляется разработка многих других принципиальных документов и разделов проекта:

- монтажного плана оборудования;
- дизайн-проекта или проекта архитектурно-художественного оформления интерьера помещения;
- спецификаций оборудования;
- локальных смет на приобретение и монтаж оборудования;
- расчет объектных и сводных смет, определяющих сумму инвестиций и их эффективность по проекту в целом;

– технических заданий на проектирование специального оборудования и т. д.

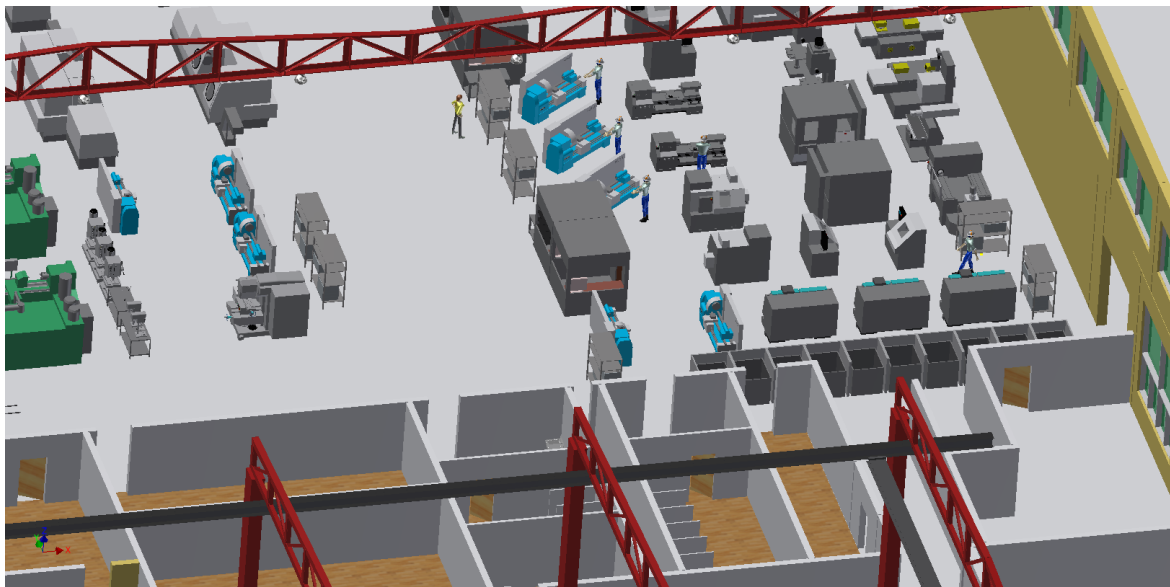


Рис. 4. Трехмерная модель производственного участка цеха в составе трехмерного (объемного) макета цеха (фрагмент)

В этой связи весьма важной задачей в проектах технического перевооружения является задача оптимизации проектов планировок технологического оборудования в автоматизированных системах технологической подготовки производства (АСТПП).

3. Оптимизация планировок технологического оборудования в проектах технического перевооружения цехов и участков машиностроительных предприятий

Аналитический обзор методов оптимизации технологических планировок оборудования в проектах технического перевооружения и реконструкции машиностроительного производства указывает на то, что такие разработки чертежей, как правило, имеют оптимальные решения [1; 2], рис. 5–7.

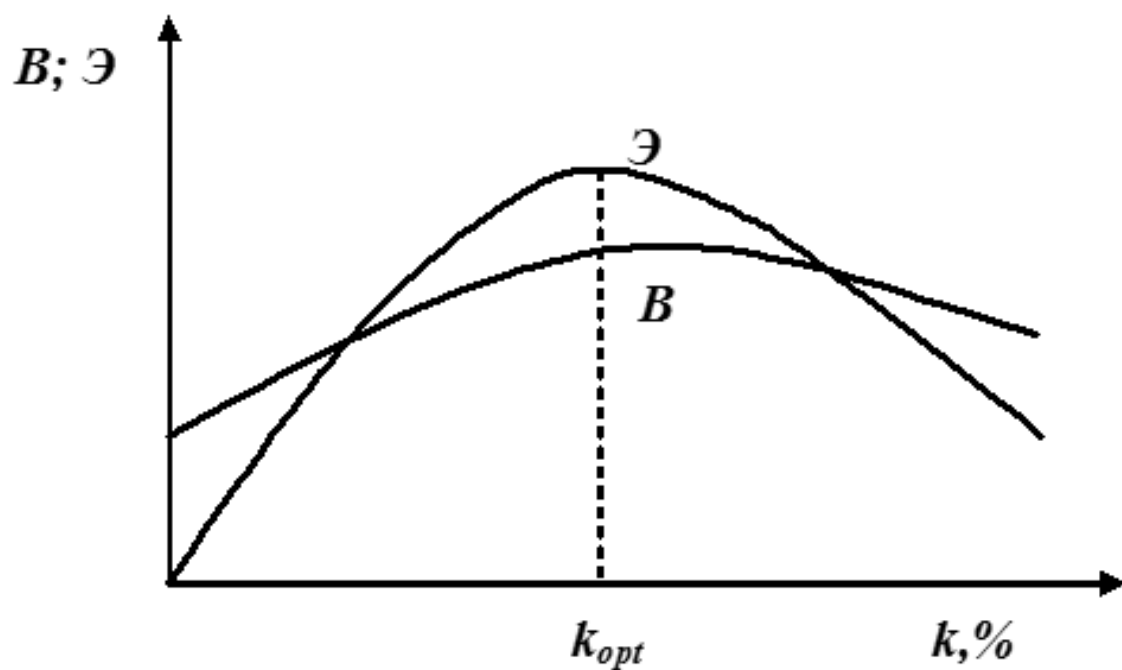


Рис. 5. Зависимость изменения прироста выработки B и экономического эффекта \mathcal{E} от коэффициента выбытия основных фондов k

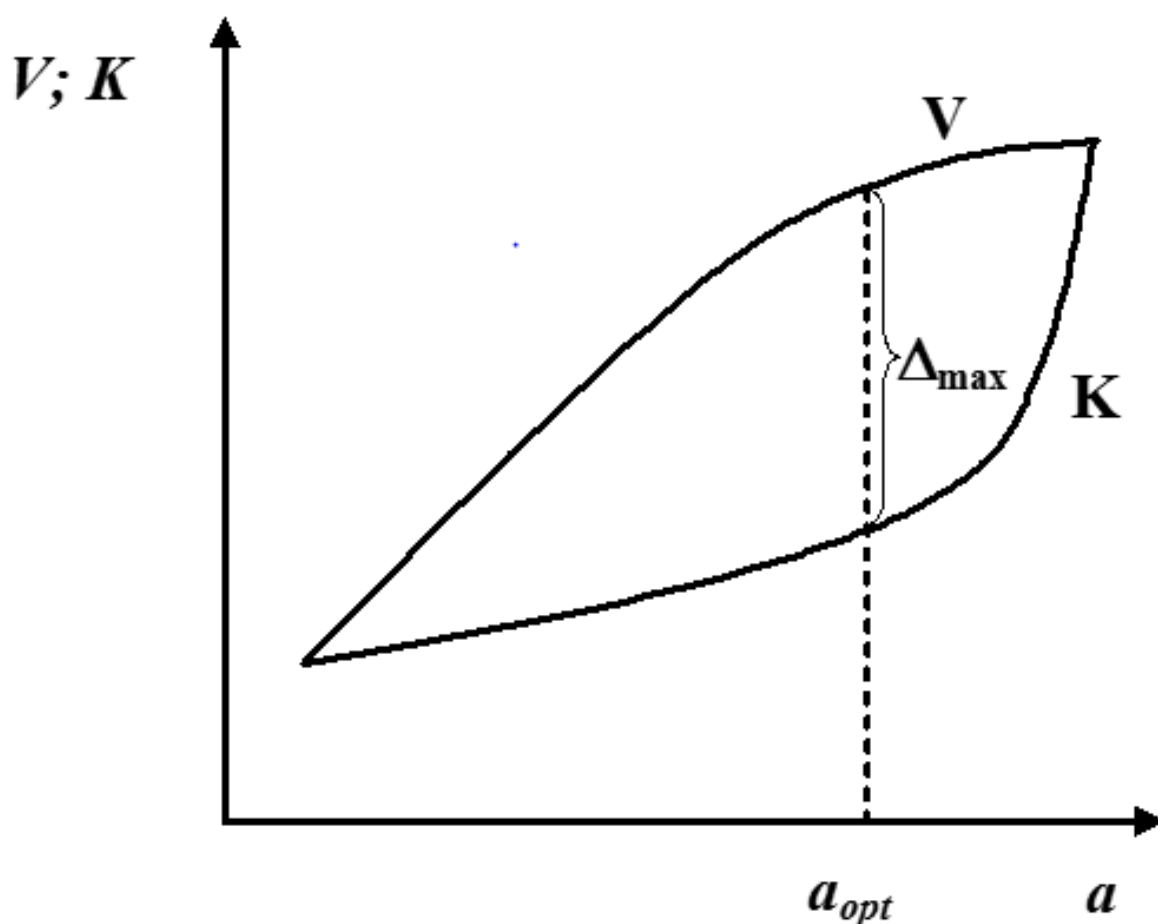


Рис. 6. Зависимость изменения объема выпуска продукции V и величины капиталовложений K от уровня автоматизации производства a

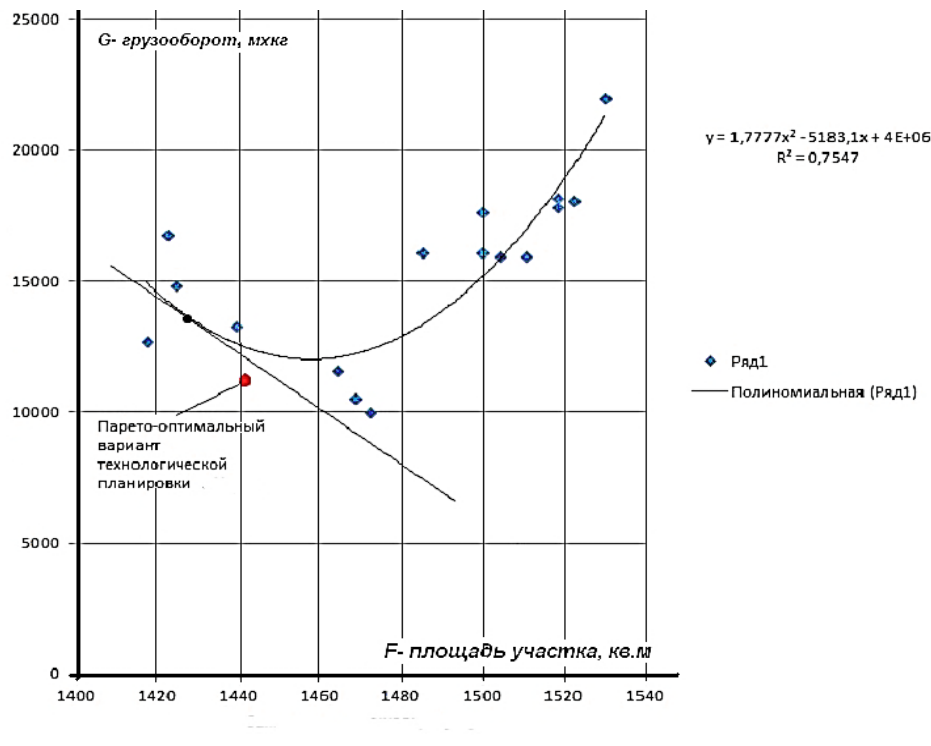


Рис. 7. Парето-оптимальное решение планировки оборудования участка

На основании приведенных зависимостей и уравнений регрессии можно сделать вывод о том, что в проектах реконструкции и технического перевооружения необходимо искать компромиссные решения при выполнении чертежей технологических планировок оборудования:

1. Экономический эффект (\mathcal{E} на рис. 5) должен стремиться к максимуму, при этом критерий оптимизации в виде приведенных затрат должен стремиться к минимуму $Z \rightarrow \min$.

2. Выработка (B на рис. 5) или производительность труда при обновлении парка технологического оборудования, как критерий оптимизации также должен стремиться к максимуму, а обратная величина производительности труда – штучное время должна быть минимизирована $t_{шт} \rightarrow \min$.

3. Капиталовложения в проект (K , рис. 6) при обновлении парка технологического оборудования должны быть минимизированы $K \rightarrow \min$.

4. Величина уровня автоматизации (a , рис. 6), как правило, должна стремиться к максимуму при решении задачи о замене оборудования в проекте технического перевооружения, если этот показатель ниже оптимального значения, а обратный этой величине параметр должен быть также минимизирован

$(1-a) \rightarrow \min$ в условиях, когда объем выпуска (V) или связанная с этим показателем величина производственной мощности или пропускной способности структурного подразделения является наперед заданным ограничением по величине производственной программы.

5. Площадь производственного участка (F , рис. 7) при выполнении чертежа технологической планировки участка должна быть минимизирована до пределов лимитированных нормативами расстояний между оборудованием $F \rightarrow \min$.

6. Грузооборот (G на рис. 7) путем обеспечения принципа прямоточности и устранения «петель» в движении партий изделий также должен быть минимизирован $G \rightarrow \min$.

Для использования любой рекуррентной нейронной сети в задаче многокритериальной оптимизации необходимо произвести линейную свёртку входных параметров – критериев оптимизации (привести входные параметры к безразмерной величине по условиям применения методов многокритериальной оптимизации).

На основании изложенного можно следующим образом определить целевую функцию многокритериальной оптимизации чертежей технологических планировок оборудования в проектах реконструкции и технического перевооружения производства:

$$Z = \mu_1 \cdot Z_{\text{пр}} + \mu_2 \cdot t_{\text{шт}} + \mu_3 \cdot K + \mu_4 \cdot (1-a) + \mu_5 \cdot F + \mu_6 \cdot G \rightarrow \min, \quad (1)$$

при значениях суммы весовых коэффициентов μ_i равной единице.

$$\sum_{i=1}^6 \mu_i = 1,0. \quad (2)$$

Для реализации решения данной задачи многокритериальной оптимизации можно использовать средства искусственного интеллекта в виде рекуррентных нейронных сетей, а для определения ограничения в виде объема выпуска продукции (V) или в виде величины производственной программы можно рекомендовать для использования LVQ – нейронную сеть (или искусственную нейронную сеть Кохонена), которая решает задачу кластеризации изделий (классификации и группирования деталей, сборочных единиц, комплектов, комплексов) и позволяет разработать ведомость производственной программы.

4. Использование искусственных нейронных сетей для оптимизации технологических планировок оборудования в проектах реконструкции и технического перевооружения производства.

Определение производственной программы. Для расчета ведомости производственной программы, которая наряду с проектным технологическим процессом, является основанием для определения парка оборудования и последующего выполнения чертежа технологической планировки в данном исследовании применена нейронная *LVQ*-сеть искусственного интеллекта. Она основана на обучающемся векторном квантовании (*LVQ-Learning Vector Quantization*) и представляет собой обучающийся слой Кохонена. Для построения *LVQ*-сети задается количество кластеров (нейронов) n , количество классов m и принадлежность каждого кластера определенному классу.

В процессе обучения *LVQ*-сети веса нейронов настраиваются с учетом принадлежности обучающих примеров и кластеров одному классу. Обученная *LVQ*-сеть производит кластеризацию входных векторов (номенклатуры изделий) с учетом известных классификаторов деталей Единой системы конструкторской документации и дополнительного технологического кода деталей, определяемого по методике Единой системы технологической подготовки производства.

Архитектура *LVQ*-сети [3], предназначенной для классификации и группирования изделий при формировании ведомости производственной программы показана на рисунке 8.

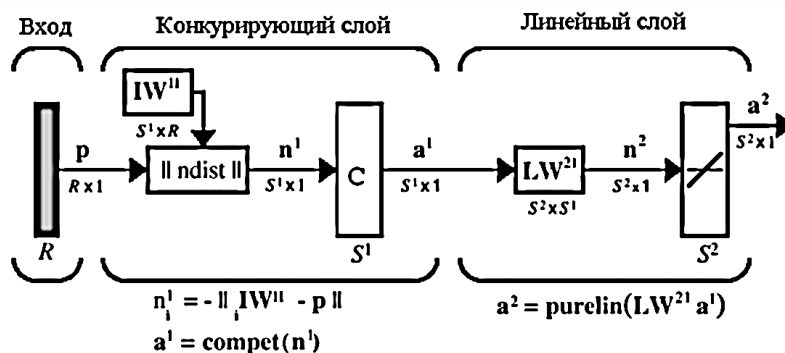


Рис. 8. Архитектура *LVQ*-сети

В данной публикации рассмотрена реализация *LVQ*-сети, состоящая из двух слоев: конкурирующего и линейного. Конкурирующий слой выполняет кластеризацию векторов, а линейный слой соотносит кластеры с целевыми классами,

заданными пользователем. В результате сеть производит классификацию и группирование номенклатуры изделий для формирования ведомости производственной программы. Такой подход реализован в *Neural Networks Toolbox* системы *MATLAB*. Входной слой обучается одним из алгоритмов обучения *LVQ*-сетей (в *Neural Networks Toolbox* реализованы алгоритмы *LVQ1* и *LVQ2.1*).

Как в конкурирующем, так и в линейном слое приходится 1 нейрон на кластер или целевой класс. Таким образом, конкурирующий слой способен поддерживать до S^1 кластеров; эти кластеры, в свою очередь, могут быть соотнесены с S^2 целевыми классами, причем S^2 не превышает S^1 . Например, предположим, что нейроны 1–3 конкурирующего слоя определяют 3 кластера, которые принадлежат к одному целевому классу #2 линейного слоя. Тогда выходы конкурирующих нейронов 1–3 будут передаваться в линейный слой на нейрон n^2 с весами, равными 1, а на остальные нейроны с весами, равными 0. Таким образом, нейрон n^2 возвращает 1, если любой из трех нейронов 1–3 конкурирующего слоя выигрывает конкуренцию.

Короче говоря, единичный элемент в i -й строке вектора a^1 (остальные элементы a^1 нулевые) однозначно выберет i -й столбец матрицы весов LW^{21} в качестве выхода сети. При этом каждый столбец, в свою очередь, содержит единственный элемент, равный 1, который указывает принадлежность к классу. Таким образом, кластер с номером 1 из слоя 1 может оказаться отнесенным к различным классам в зависимости от значения произведения $LW^{21}a^1$.

Поскольку заранее известно, как кластеры первого слоя соотносятся с целевыми классами второго слоя, то это позволяет заранее задать элементы матрицы весов LW^{21} . Однако, чтобы найти правильный кластер для каждого вектора обучающего множества, необходимо выполнить процедуру обучения сети.

Оптимизация парка оборудования и его планировки также может быть осуществлена с использованием искусственных нейронных сетей, например, рекуррентной нейронной сети Джордана по минимизируемым критериям целевой функции [1]. Для применения таких рекуррентных нейронных сетей необходимо

построить многовариантный сетевой граф замены технологического оборудования в базовом технологическом процессе (рис. 9).

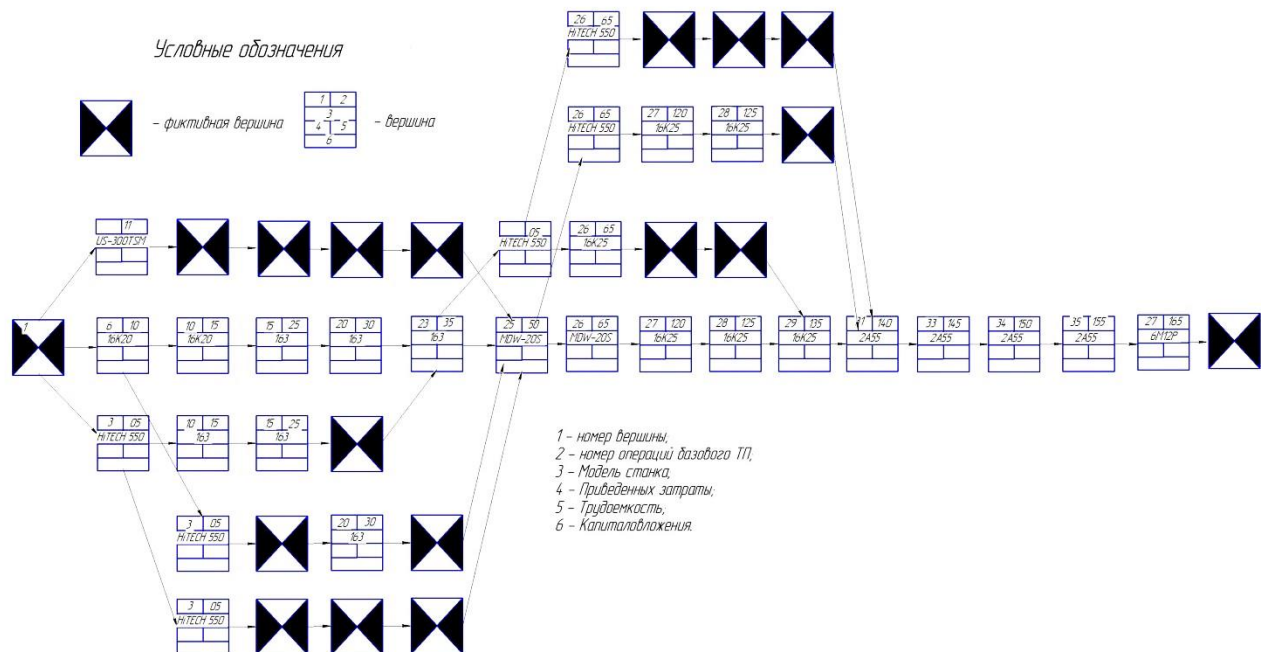


Рис. 9. Многовариантный сетевой граф замены технологического оборудования базового технологического процесса

Рекуррентная нейронная сеть осуществляет последовательный расчет всех полных путей на таком структурном графе и позволяет найти оптимальный путь, т.е. решить задачу многокритериальной оптимизации парка технологического оборудования и его размещения на чертеже технологической планировки оборудования (рис. 10).

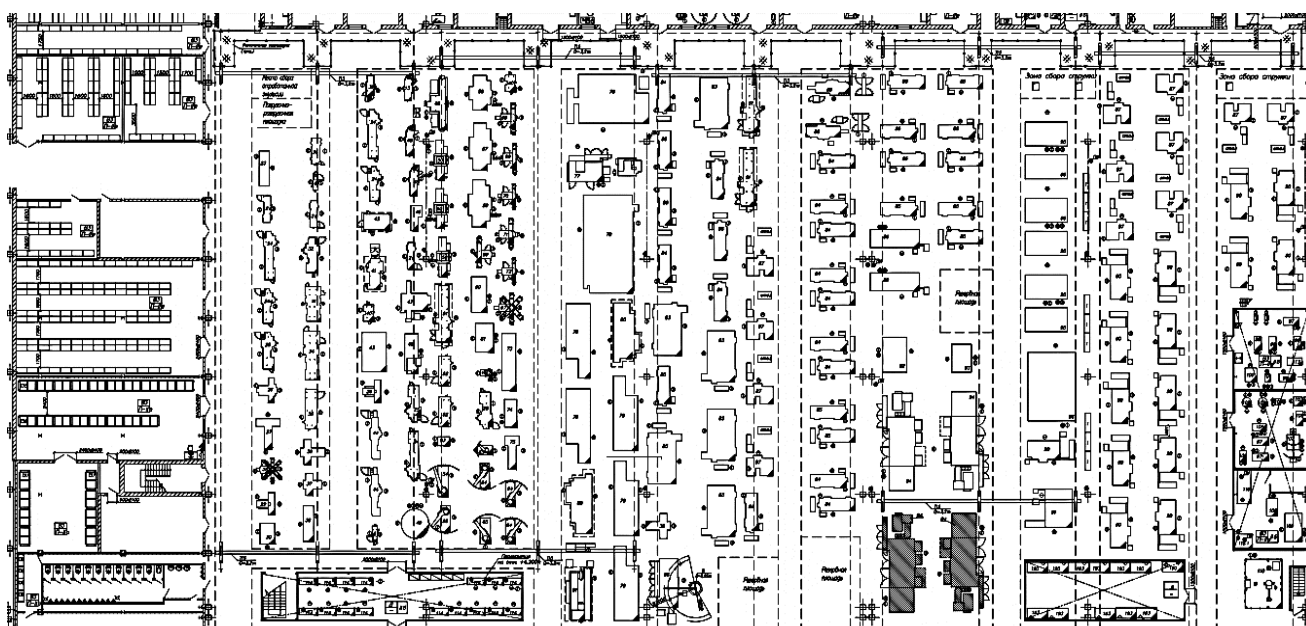


Рис. 10. Фрагмент технологической планировки оборудования корпуса производства деталей авиационных двигателей

Оптимизация проектных технологических процессов. В проектах технического перевооружения производства в ходе решения задачи об оптимизации парка оборудования нередко решают также задачу оптимизации проектных технологических процессов по частным критериям обобщенной целевой функции (1).

Для выбора проектных технологических процессов используют не только экономические показатели, например, минимум технологической себестоимости или приведенных затрат, но и различные показатели технического уровня. При этом наивысшие значения критерия технического уровня позволяют утверждать, что данная технология является «высокой». В практике технологического проектирования, как в нашей стране, так и за рубежом, применяют большое число показателей для оценки технического уровня производства (технологии).

В рассматриваемой публикации в целях использования рекуррентной искусственной нейронной сети Элмана необходимо вначале данной процедуры произвести приведение входных параметров к безразмерной величине по условиям применения методов многокритериальной оптимизации (1). Эта часть работ предусматривает использование в среде *Matlab* метода линейно-аддитивной свертки. В качестве входных параметров численной оценки проектных техноло-

гических процессов рекомендуется использовать три минимизируемых параметра: затрат, трудоемкости и коэффициента технического использования оборудования (главный показатель надежности технологического оборудования).

Таким образом, была разработана гибридная вычислительная система искусственного интеллекта на основе нейронных сетей Элмана с элементами нечеткой логики (*Fuzzy Logic*), что обеспечивает многокритериальную оптимизацию не только проектных технологических процессов, но и технологических планировок оборудования для обоснования инновационных проектов технического перевооружения производства.

Заключение

В условиях реконструкции (модернизации) производства технологическая часть (технологические решения) проекта является центральным разделом, который обеспечивает экономическую эффективность инвестиций в проект. Технологическое перевооружение рассматривается как основа более масштабных проектов – проектов реконструкции, так и самостоятельных проектов коренного переустройства технологий – проектов технического перевооружения.

Техническое перевооружение (технологическое перевооружение, модернизация, техническая реконструкция) в инновационной деятельности, как показывает практика, обеспечивают улучшение большинства технико-экономических показателей действующего производства.

Использование искусственных нейронных сетей в инновационных проектах технического перевооружения машиностроительного производства позволяет осуществлять многокритериальную структурную оптимизацию планировок технологического оборудования по основным технико-экономическим показателям, что обеспечивает наивысшую эффективность проектно-технологических решений.

Список литературы

1. Селиванов С.Г. Системотехника инновационной подготовки производства в машиностроении / С.Г. Селиванов, М.Б. Гузаиров. – М.: Машиностроение. – 2012. – С. 568.

2. Инновационное проектирование цифрового производства в машиностроении / С.Г. Селиванов, А.Ф. Шайхулова, С.Н. Поезжалова, А.И. Яхин. – М.: Инновационное машиностроение. – 2016. – С. 256.

3. Медведев В.С. Нейронные сети. MATLAB 6 / В.С. Медведев, В.Г. Потемкин; под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М: ДИАЛОГ-МИФИ. – 2001. – С. 630.

Насибуллин Денис Рустемович – магистрант ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, Уфа.

Nasibullin Denis Rustemovich – master FSBEI of HE “Ufa State Aviation Technical University”, Russia, Ufa.

Токарева Дарья Игоревна – магистрант ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, Уфа.

Tokareva Darya Igorevna – master FSBEI of HE “Ufa State Aviation Technical University”, Russia, Ufa.

Селиванов Сергей Григорьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Россия, Уфа.

Selivanov Sergey Grigorievich – doctor of technical sciences, professor of the Department of Mechanical Engineering technology FSBEI of HE “Ufa State Aviation Technical University”, Russia, Ufa.
