

С. Г. Селиванов, С. Н. Поезжалова

**МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ДИРЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В АСПП**

Предложена методика математического моделирования и оптимизации директивных технологических процессов по изготовлению деталей камеры сгорания авиационных двигателей для применения в автоматизированных системах технологической подготовки производства при создании технологических инноваций с помощью методов искусственного интеллекта. *Оптимизация; директивный технологический процесс; автоматизированная система технологической подготовки производства; математическое моделирование; искусственный интеллект*

Системотехника как научное направление обеспечивает проектирование, создание, испытание и эксплуатацию сложных систем. В данном случае системотехника использована для решения задач инновационного проектирования в автоматизированных системах технологической подготовки производства (АСТПП) при создании технологических инноваций с помощью методов искусственного интеллекта.

Известно, что система может быть представлена следующими компонентами:

$$S \equiv_{\text{def}} \langle\langle Z \rangle\rangle, \langle\langle \text{Str} \rangle\rangle, \langle\langle \text{Tech} \rangle\rangle, \langle\langle \text{Cond} \rangle\rangle, \quad (1)$$

где  $\langle\langle Z \rangle\rangle$  – совокупность целей;  $\langle\langle \text{Str} \rangle\rangle$  – совокупность структур, реализующих цели;  $\langle\langle \text{Tech} \rangle\rangle$  – совокупность технологий, реализующих систему;  $\langle\langle \text{Cond} \rangle\rangle$  – условия существования системы, т. е. факторы, влияющие на ее создание, функционирование и развитие. Отсюда ключевыми компонентами для дальнейшего математического моделирования и оптимизации технологических инноваций нами выбраны: цели; структуры; технологии; условия создания, функционирования и развития.

Технологии систем, которые выше были определены в формуле (1) в виде синтагмы, также как цели, структуры и условия функционирования и развития определяют сущностную основу путей и методов инновационного проектирования любой системы. Рассмотрим в этой связи более подробно системотехнические представления о «директивных технологиях».

### 1. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИРЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Известно, что технология – это совокупность знаний о способах и средствах проведе-

ния производственных процессов, в результате которых происходит качественное изменение обрабатываемого объекта, а также сами указанные процессы. Инновационное проектирование в технологии машиностроения как науки рассматривает в первую очередь принципиально важные критические технологии:

- нанотехнологии и прецизионные технологии обработки;
- мехатронные технологии;
- лазерные и электронно-ионно-плазменные технологии;
- технологии керамических материалов, композитов, металлов и сплавов со специальными свойствами, технологии синтетических сверхтвердых материалов;
- технологии биметаллов, термодиффузионного сращивания деталей.

Этот перечень можно дополнить важными высокими (проектными, перспективными и директивными) технологиями, которые в настоящее время также являются предметами инновационного проектирования в машиностроении:

литейного производства (литья под низким давлением, получения высокоточных отливок в формы на основе электрокорунда, литья под регулируемым давлением, технологии жидкой штамповки, технологии литья в графитовые и керамические формы, литья под электромагнитным давлением, литья методом направленной кристаллизации, литья выжиманием, литья в вакуумированные пресс-формы, технологии плазменно-индукционной плавки, электронно-лучевой плавки, литья в вакуумно-пленочные формы, литья в замороженные формы и т. д.);

- обработки металлов давлением (например, взрывная штамповка, электровысадка, сферодвижная штамповка обкатыванием, штамповка на термопрессах, электрогидравлическая

штамповка, малоотходные и высокоточные порошковые технологии на пресс-автоматах);

- высокоскоростной обработки, которые обеспечивают многократное увеличение производственных мощностей предприятий (например, а) *высокоскоростной*: лазерной и гидроабразивной резки заготовок, обработки металлов резанием, термообработки, химико-термической обработки и гомогенизирующего отжига в условиях низкочастотных акустических воздействий, химико-термической обработки отливок в жидкофазовом состоянии, химико-термической обработки в условиях энергетической поляризации, ультразвукового и электрических полей, с использованием реагентосодержащих шаржированных материалов, лазерной химико-термической обработки; б) скоростного: нанесения износостойких металлофторуглеродных покрытий в условиях ультразвуковых воздействий, термомодеформационного борирования, высокоскоростной плавки металлов, глубинного шлифования) и т.д.

Для дальнейшего математического моделирования и оптимизации новых технологий в инновационных проектах технологического профиля важно отметить, что:

- перспективная технология – это технологический процесс, соответствующий современным достижениям науки и техники, методы и средства осуществления которого полностью или частично предстоит освоить на предприятии;

- директивная технология – это в данном случае совокупность комплектов документов на отдельные технологические процессы, необходимые и достаточные для решения предварительных укрупненных инженерно-технических, организационно-экономических задач, при принятии решения по постановке новых изделий на производство применительно к условиям конкретного предприятия;

- проектная технология – это в данном случае комплект технологической документации, который предназначен для применения при проектировании нового производства (строительства или расширения действующего предприятия) или реконструкции (технической реконструкции и технического перевооружения) действующего предприятия. Базовые рабочие технологические процессы, т. е. технологические процессы, выполняемые по рабочей технологической и (или) конструкторской документации, в ходе строительства, реконструкции и

технического перевооружения должны пересматриваться и замещаться новыми, более прогрессивными технологиями.

Главное, что отличает директивные и перспективные технологические процессы, заключается в том, что экономический эффект от применения директивных технологических процессов, чаще всего направленных на повышение конкурентоспособности (качества продукции), проявляется главным образом в сфере эксплуатации изделия и в увеличении объемов продаж новой конструкции с улучшенными качественными свойствами. У перспективных технологических процессов экономический эффект от ресурсосбережения проявляется в первую очередь в сфере производства изделия и увеличения объема продаж от снижения цены изделия.

В процессе проектирования директивных технологических процессов [1] технолог имеет две основные возможности: либо рецептурного улучшения технологического процесса путем выбора того или иного варианта операций, методов обработки или сборки, средств технологического оснащения, либо использовать методы системотехнического проектирования на основе математического моделирования и оптимизации проектно-технологических решений, руководствуясь различными критериями.

## **2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ДИРЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СРЕДСТВАМИ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА**

Для обеспечения конкурентоспособности новых изделий на этапах и стадиях НИОКР необходимо рассматривать соотношение двух групп критериев:

- качества изделия, показателями которого являются параметры технического уровня, технологичности;

- цены изделия, показателями которой являются параметры затрат, капиталовложений и рисков инвестиционных проектов.

В рамках данной публикации предложено рассматривать в качестве главных критериев оптимизации директивных технологических процессов:

- наивысшие значения параметров технического уровня новых изделий, которые обеспечивают директивные технологические процессы, а также

- наименьшую трудоемкость обработки или сборки,
- минимальные затраты;
- наименьший риск (в первую очередь от брака при внедрении новой технологии).

Для осуществления многокритериальной оптимизации директивных технологических процессов по описанным выше критериям можно использовать программную среду Matlab и пакет Neural Network. Для решения поставленной задачи применена гибридная сеть в виде рекуррентной сети Элмана с элементами нечеткой логики. Разработанный программный продукт содержит две основные части для определения оптимального директивного технологического процесса.

Первая часть критериев определяется по параметрам технического уровня изделия, которое можно представить в виде 3-х лингвистических переменных, которые учитывают влияние новой (директивной) технологии на улучшение главных параметров технического уровня изделия:

- технологии, которые не влияют на технический уровень изделия, например, на величину тяги двигателя, ресурса, надежности и т. п.;
- технологии, оказывающие слабое влияние на технический уровень изделия;
- технологии, которые оказывают сильное влияние на технический уровень изделия.

Принятый в исследовании способ определения названных критериев оптимизации предполагает использование методов нечеткой логики, которые широко применяют в теории искусственного интеллекта. Максимальные значения таких параметров качества изделия позволяют определить приоритет технологий при выборе методов обработки (сборки) для обеспечения конкурентоспособности, в данном случае, авиационного двигателя.

Вторая часть критериев программного продукта содержит численные оценки, что позволяет использовать для многокритериальной оптимизации искусственные нейронные сети. В данном случае предложено использовать нейронную сеть Элмана, которая характеризуется частичной рекуррентностью в форме обратной связи между скрытым и входным слоем, реализуемой с помощью единичных элементов запаздывания, что позволяет решать оптимизационные задачи в данном случае для структурной оптимизации технологических процессов на многовариантных сетевых графах.

### 3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ЗАВИСИМОСТИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДИРЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПРИМЕРЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В качестве примера реализации рассмотренной выше методики рассмотрим процедуру многокритериальной оптимизации деталей типа «Стойки камеры сгорания ГТД» (рис. 1).

В целях выполнения системного анализа, математического моделирования и оптимизации директивных технологических процессов изготовления рассмотренных деталей камер сгорания ГТД, построен многовариантный граф выполнения различных вариантов типовых директивных технологических процессов изготовления детали «Стойка». На основании данных графа показано, что при решении оптимизационной задачи на графе можно получить локальные оптимумы (рис. 2, 3, 4), глобальный оптимум с учетом рисков от внедрения директивной технологии (рис. 5) и прилегающие к этим оптимумам Парето-оптимальные решения по выбору директивных технологических процессов.

Для определения названных зависимостей с помощью программы динамического программирования просчитаны сотни различных вариантов директивных технологических процессов, применительно к рассматриваемому типу деталей, которые можно разделить на 3 группы в зависимости от вида обработки, которые наиболее существенно влияют на качество ГТД – это директивные технологические процессы, основанные на пайке, аргонодуговой сварке и электронно-лучевой сварке.

Полученные зависимости, необходимые для проектирования директивных технологических процессов изготовления деталей ГТД, продемонстрированы на примере исследования вариантов типовых директивных технологических процессов детали камеры сгорания «Стойка». Ниже рассмотрим результаты исследования закономерностей влияния директивных технологических процессов на качество и технический уровень новой техники.

Обобщением [2] регрессионных зависимостей (рис. 2–4) является поверхность (рис. 5), которую можно представить уравнением.

$$z = \frac{x^2}{2p} + \frac{y^2}{2q} \quad (2)$$

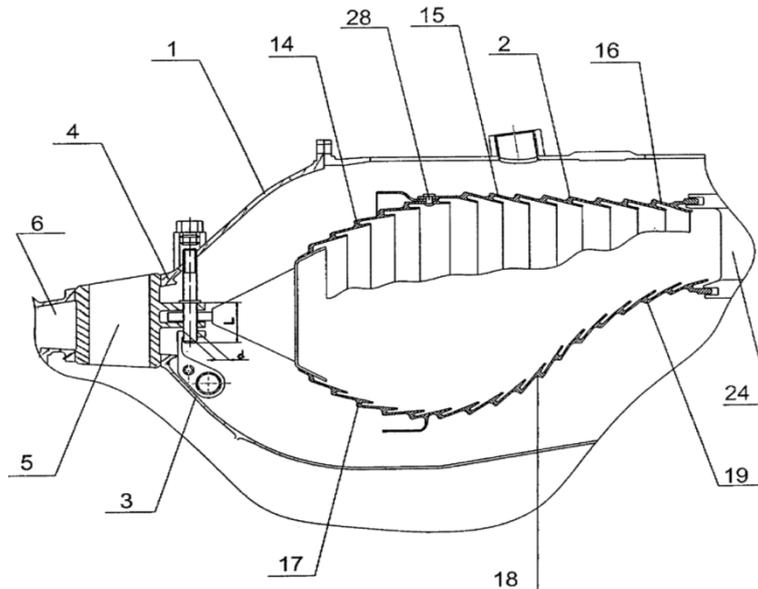
при  $p > 0$ ,  $q > 0$  поверхность называется эллиптическим параболоидом. При этом сечения по плоскостям  $XOZ$  и  $YOZ$  (главные сечения) – параболы.

$$x^2 = 2pz, \quad y^2 = 2qz. \quad (3)$$

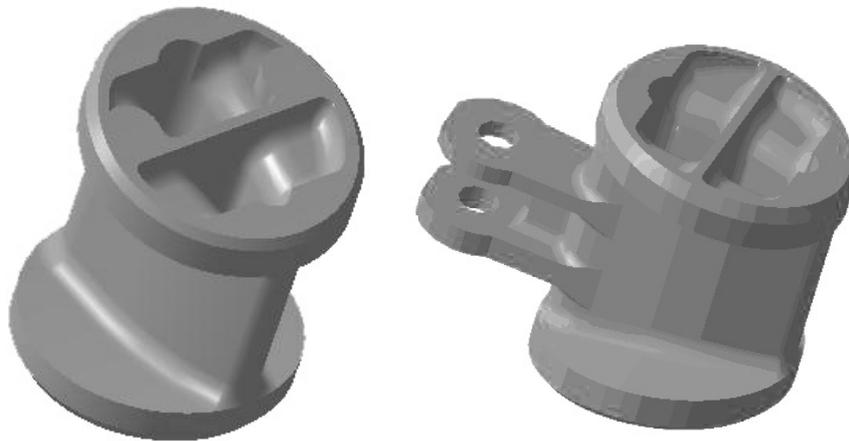
На основании полученных регрессий можно утверждать, что решение задачи о структурной оптимизации директивных технологических

процессов в данном случае может рассматриваться с двух точек зрения:

- определения глобального оптимума по критерию минимума затрат ( $C$ , руб) на изготовление анализируемых деталей;
- определения Парето-оптимального решения по всем трем критериям оптимизации – минимумов затрат ( $C_{\min}$ ), трудоемкости ( $T_{\min}$ ) и рисков ( $R_{\min}$ ).



*a*



*б*

**Рис. 1.** Примеры 3D-моделей деталей камеры сгорания «Стойка»: *a* – общий вид диффузора камеры сгорания авиационного двигателя; *б* – образцы деталей типа «Стойка» (позиция 5)

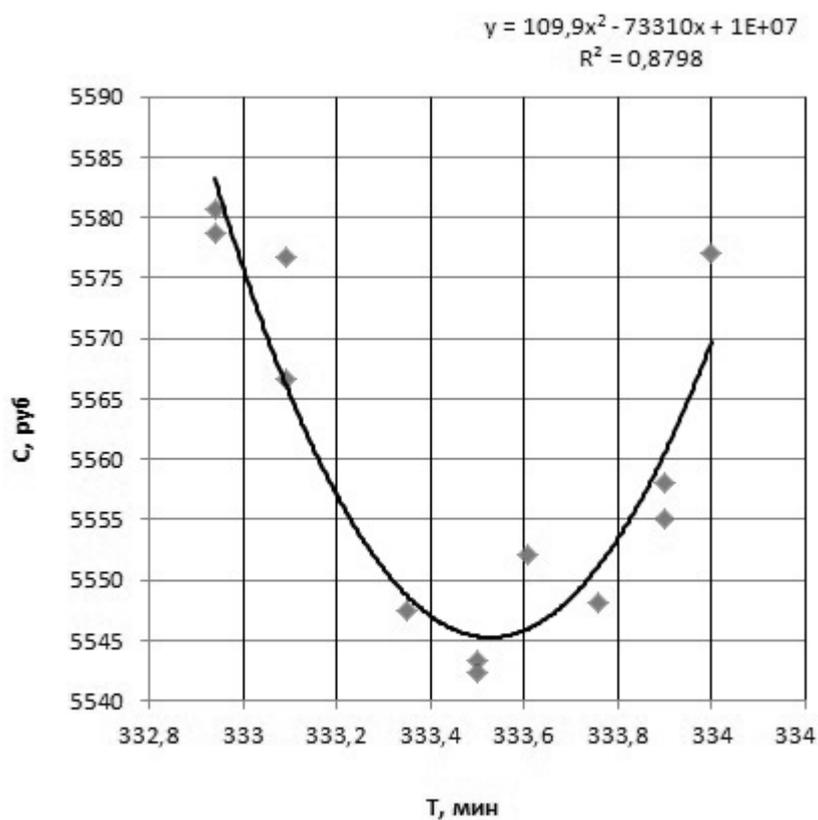


Рис. 2. Пример зависимости для директивного технологического процесса детали камеры сгорания «Стойка», основанных на пайке

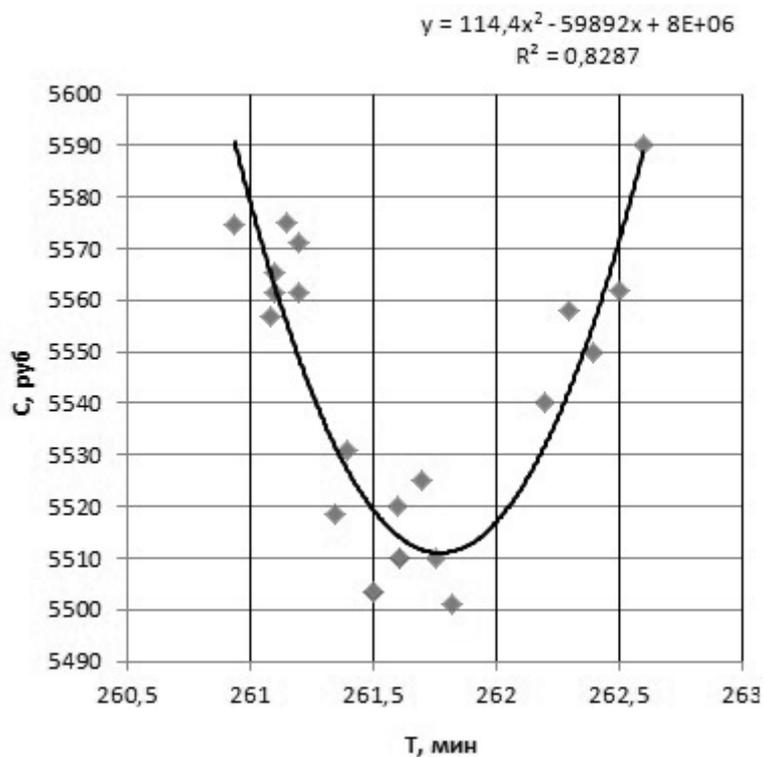


Рис. 3. Пример зависимости для директивного технологического процесса детали камеры сгорания «Стойка», основанных на аргонодуговой сварке

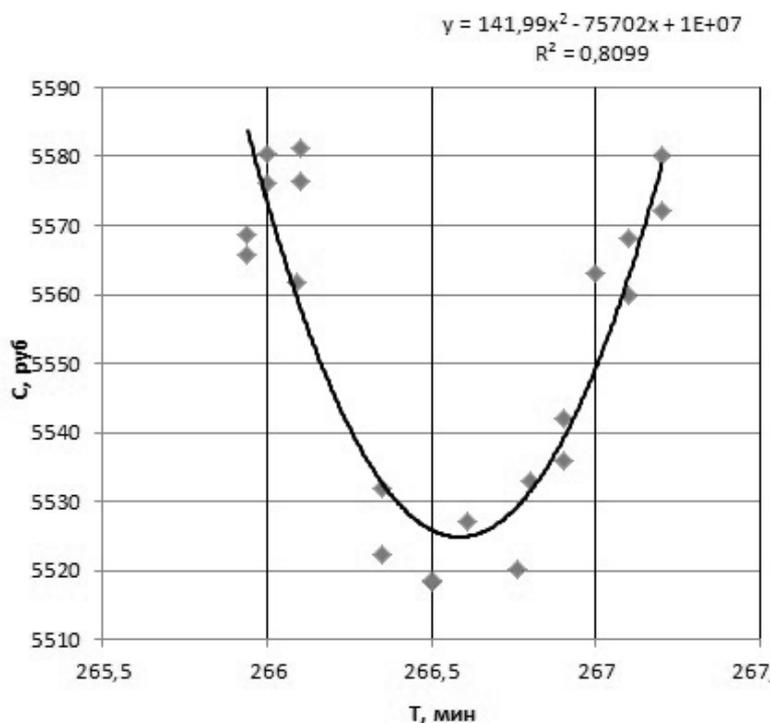


Рис. 4. Пример зависимости для директивного технологического процесса детали камеры сгорания «Стойка», основанных на электроно-лучевой сварке

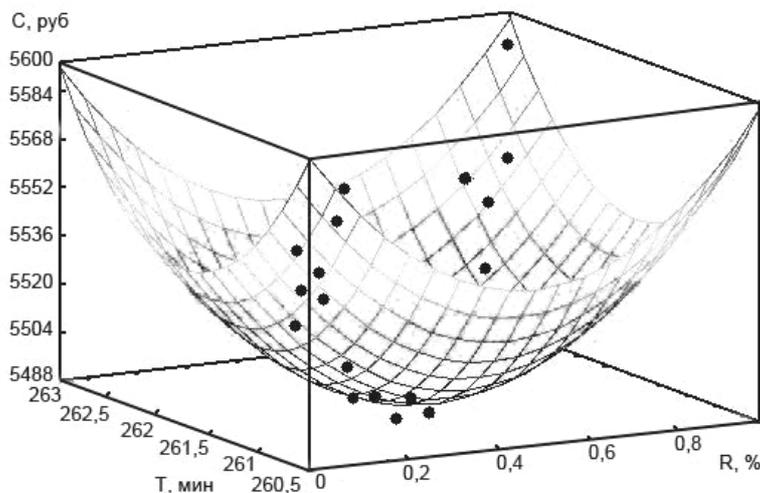


Рис. 5. Трехмерный график зависимости затрат, трудоемкости и рисков – эллиптический параболоид

#### 4. ПРОГРАММНЫЕ ПРОДУКТЫ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ДИРЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ СРЕДСТВ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Для использования сети Элмана в задачах многокритериальной оптимизации и определения Парето-оптимального директивного технологического процесса по всем рассмотренным критериям необходимо вначале осуществить приведение входных параметров к безразмерной величине. Эта часть работ предусматривает ис-

пользование в среде Matlab метода линейно-аддитивной свертки [2]. В качестве входных параметров численной оценки директивных технологических процессов использованы 3 критерия минимумов затрат, трудоемкостей и рисков. Для реализации метода линейно-аддитивной свертки необходимо вначале установить для выражений (4–6) веса приоритетов от 0 до 1:

- для трудоемкости (в данном случае назначен приоритет 0,5);
- для затрат (0,35);

- для критерия риска (0,15).

$$\hat{\varepsilon} = \frac{(\varepsilon^i - \varepsilon_{\min}^i)}{(\varepsilon_{\max}^i - \varepsilon_{\min}^i)}, \quad (4)$$

где  $\hat{\varepsilon}$  – величина  $i$ -го критерия, приведенная к относительному безразмерному виду;

$\varepsilon^i$  – значение  $i$ -го критерия  $i \in [1, m]$ ;

$\varepsilon_{\min}^i$ ,  $\varepsilon_{\max}^i$  – минимальное и максимальное из всех возможных значений  $i$ -го критерия.

$$\varepsilon_{\Sigma} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \hat{\varepsilon}, \quad (5)$$

где  $\alpha_i$  – весовые коэффициенты, назначаемые экспертно, определяют значимость соответствующего критерия среди рассматриваемого множества.

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i = 0,35 + 0,5 + 0,15 = 1. \quad (6)$$

Рассмотрим более подробно процедуру использования нейронной сети Элмана для многокритериальной оптимизации директивных технологических процессов в авиадвигателестроении.

На рис. 6. входные значения, определенные по формулам (4, 5, 6) подаются в скрытый слой, где находятся контекстные нейроны с обратными связями [3, 4], далее преобразованные значения после прохождения по скрытому слою подаются на выходной слой. Контекстные нейроны – это нейроны, содержащие копию значений активации скрытых нейронов для предыдущего временного отсчета.

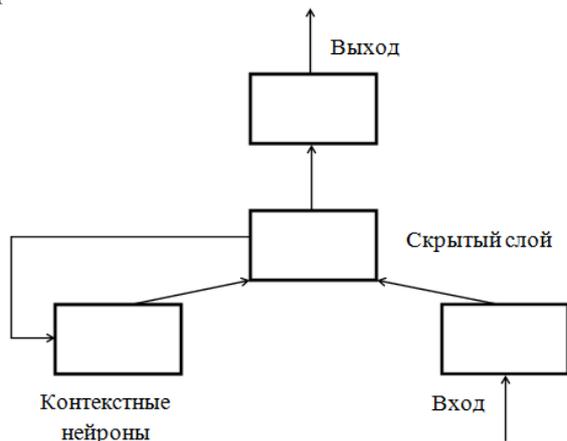


Рис. 6. Обобщенная схема нейронной сети Элмана

В приложении к решению рассматриваемой задачи многокритериальной оптимизации директивных технологических процессов можно

перейти от нейронной сети Элмана общего вида (рис. 6) к полномасштабной модели нейронной сети Элмана (рис. 7). На этом рисунке изображена нейронная сеть с двумя скрытыми слоями и одним выходным слоем, используемая в нашей задаче многокритериальной оптимизации директивных технологических процессов. Как видно из рис. 7, связи идут от выходов внутренних нейронов, что позволяет учесть предысторию наблюдаемых процессов и накопить информацию для выработки правильной стратегии управления развитием директивной технологии.

Процесс обучения созданной нейронной сети Элмана, графически продемонстрирован на рис. 8, где показана зависимость времени (количество периодов обучения) и ошибки (средняя квадратичная ошибка) расчета. Для обучения нейросети было задано 200 итераций (шагов) с выводом результатов расчета через каждые 25 итераций с учетом погрешности расчетов сети 0,01. В рассматриваемом примере нейросеть обучилась достаточно быстро, пройдя 30 итераций из заданных 200, постепенно обучаясь и уменьшая ошибки вычислений. Реализация данных параметров обучения в системе Matlab 7.5 представлена ниже:

1. net.trainParam.epochs = 200;
2. net.trainParam.show = 25;
3. net.trainParam.goal = 0,01.

Ввод данных с многовариантного сетевого графа осуществляется с клавиатуры в окне ввода данных (рис. 9). На рис. 9 кроме данных для использования гибридной искусственной нейронной сети с элементами нечеткой логики указана также таблица (в правой части экрана) исходных данных для оптимизации директивных технологических процессов с помощью генетических алгоритмов для случая разработки проектной технологической документации строительства, реконструкции или технического перевооружения производства.

На основании данных графа рассчитаны различные варианты директивных технологических процессов в зависимости от вида обработки, это директивные технологические процессы, основанные на пайке, аргодуговой сварке и электронно-лучевой сварке, что позволяет выбрать Парето-оптимальный вариант директивного технологического процесса по названным выше критериям с учетом не только показателей качества ГТД, но и минимумов затрат, трудоемкости и рисков на изготовление деталей.

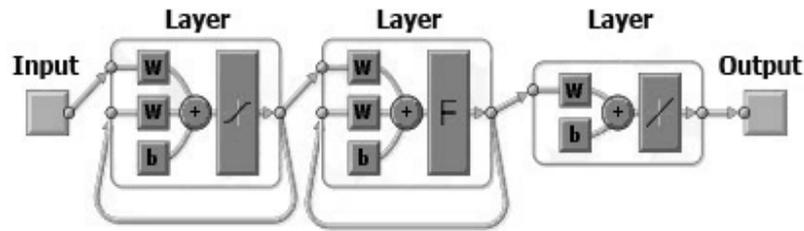


Рис. 7. Структура трехслойной нейронной сети Элмана для задачи оптимизации директивных технологических процессов

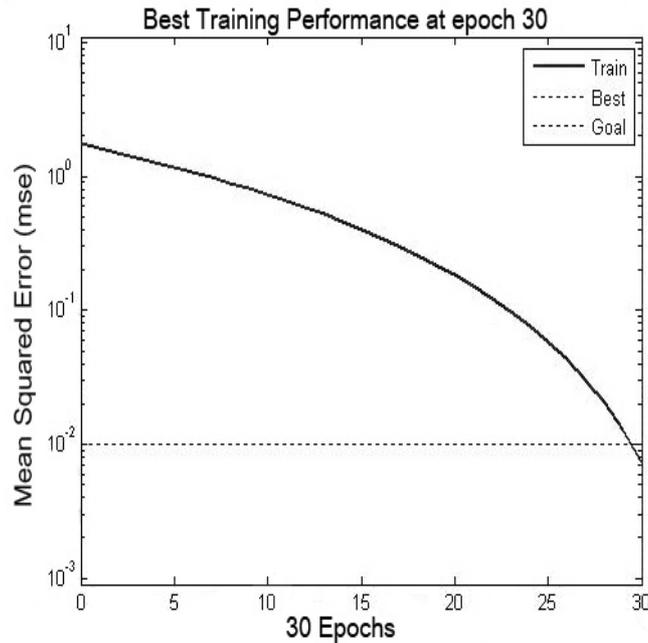


Рис. 8. График обучения нейронной сети Элмана

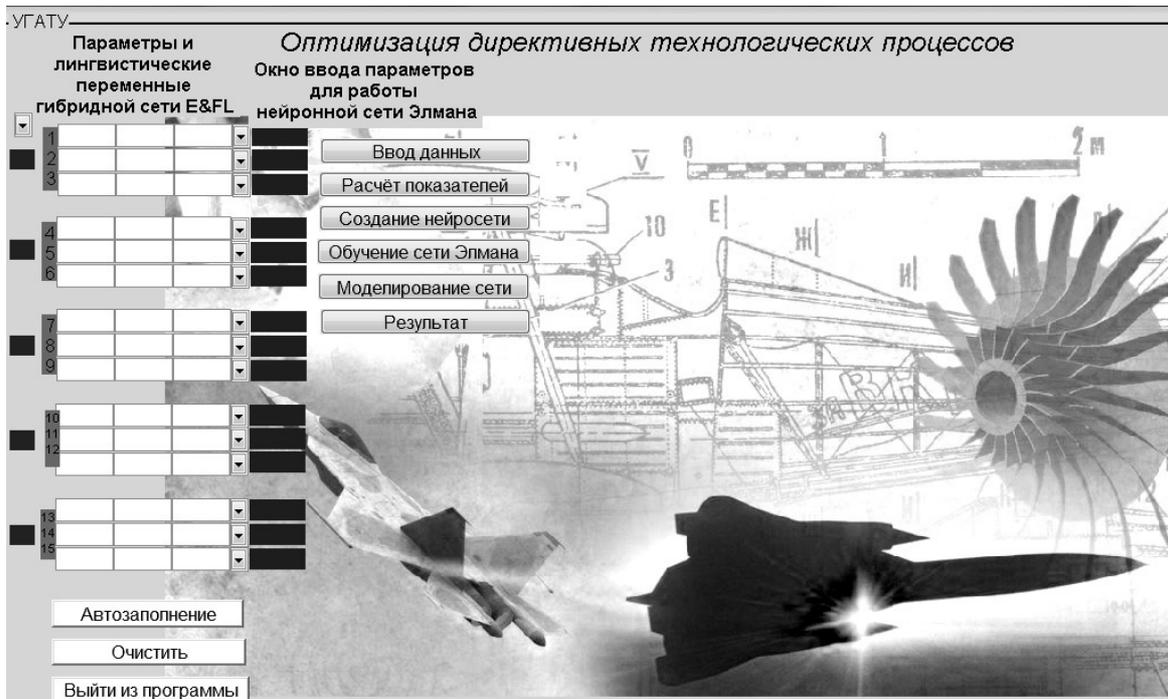


Рис. 9. Интерфейс программного продукта по оптимизации директивных технологических процессов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что разработка инновационных проектов и обоснование комплектов документации директивных технологических проектов по реализации технологических инноваций обычно включает:

- предложения, объединенные единой целью создания инноваций;
- техническое обоснование и целесообразность реализации инновационного проекта;
- экономическое обоснование инновационного проекта;
- документы, подтверждающие новизну и правозащищенность инновационного проекта;
- программу реализации инновационного проекта;
- экономическое обоснование, подтверждающее возврат средств в бюджет инвестора.

Предложенная методика математического моделирования и оптимизации директивных технологических процессов для применения в автоматизированных системах технологической подготовки производства (АСТПП) при создании технологических инноваций с помощью методов искусственного интеллекта основана на использовании программной среды Matlab и пакета Neural Network.

На примере деталей камер сгорания ГТД показано, что при решении оптимизационной задачи на графе можно получить локальные и глобальные оптимумы с учетом рисков от внедрения директивной технологии и прилегающие к этим оптимумам Парето-оптимальные решения по выбору директивных технологических процессов.

Установлено, что для решения задачи многокритериальной оптимизации директивных технологических процессов можно использовать нейронные сети Элмана и генетические

алгоритмы. Использование предложенной гибридной вычислительной системы искусственного интеллекта на основе нейронных сетей Элмана с элементами нечеткой логики обеспечивает многокритериальную оптимизацию директивных технологических процессов авиадвигателестроительного производства, что позволяет обоснованно решать задачи технологического обеспечения конкурентоспособности новых изделий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекуррентные сети и методы оптимизации проектных технологических процессов в АСТПП машиностроительных производств / С. Г. Селиванов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 5(45). С. 36–46.
2. Шипачев В. С. Высшая математика: учеб. М.: Высшая школа, 2011. 479 с.
3. Дьяконов В. П., Круглов В. В. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP2+Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. 456 с.
4. Медведев В. С., Потемкин В. Г. Нейронные сети: Matlab 6. М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. 496 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Селиванов Сергей Григорьевич**, проф. каф. технологии машиностроения. Дипленер инж. по автоматизации и комплексн. механизации машиностроения (УАИ, 1970). Д-р техн. наук по технологии машиностроения (Мосстанкин, 1991). Иссл. в обл. технологическ. подготовки, реконстр., организации пр-ва.

**Поезжалова Светлана Николаевна**, асп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ). Иссл. в обл. единых, высоких и критических технологий машиностроения.