

С. Г. Селиванов, В. В. Никитин, М. В. Селиванова

НЕЙРОСТРУКТУРНЫЙ И ЛОГИКО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Предложены методы структурной оптимизации проектных технологических процессов с использованием нейросетей и генетических алгоритмов, позволяющие определять наиболее рациональные технологические маршруты, проектные технологические процессы, парк технологического оборудования цехов в проектах нового строительства, расширения, реконструкции и технического перевооружения производства. *Реконструкция производства; техническое перевооружение; математическое моделирование; структурная оптимизация технологических процессов; рекуррентные нейронные сети; генетические алгоритмы*

ВВЕДЕНИЕ

Комплекты проектной технологической документации предназначены для применения при проектировании нового производства (строительства нового, расширения действующего предприятия) или реконструкции (технической реконструкции, технического перевооружения) действующего производства.

Базовые рабочие технологические процессы, т. е. технологические процессы, выполняемые по рабочей технологической и (или) конструкторской документации, в ходе реконструкции и (или) технического перевооружения должны пересматриваться и замещаться новыми, более прогрессивными технологиями (проектными технологическими процессами).

Рассмотрим подробнее основные цели, задачи и методы разработки проектных технологических процессов, которые позволяют в технологической части проекта реконструкции или технического перевооружения обоснованно ответить на главные вопросы:

- о новых технологических решениях,
- автоматизации технологических процессов;
- составе применяемого технологического оборудования;
- применении малоотходных технологических процессов;
- использовании более прогрессивных транспортно-технологических схем перемещения тарно-штучных грузов;
- новых методах технического контроля и испытаний изделий.

Кроме того, комплект проектной технологической документации, используемый при реконструкции и техническом перевооружении производства, позволяет ответить и на другие важные вопросы:

- о расчете топливно-энергетического и материального балансов технологических процессов;
- оценке потребности в основных видах ресурсов для технологических нужд;
- трудоемкости, станкоемкости и ремонтоемкости производства;
- расчетах количества единиц оборудования, площадей, числа работающих;
- выполнении чертежей технологических компоновок и планировок оборудования.

1. МЕТОД СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕКУРРЕНТНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

По результатам группирования деталей в автоматизированных системах технологической подготовки производства (АСТПП) должна выполняться функция «Разработка проектной технологической документации». На этом этапе необходимо решать различные задачи материало-, трудо-, энерго- и фондосбережения по результатам структурной оптимизации проектных технологических процессов как по локальным критериям высокого технического уровня, так и по обобщающим показателям экономической эффективности разработки в целом [1].

Математические модели и методы проектирования и структурной оптимизации проектных технологических процессов являются научно-

методической основой различных САПР ТП, применяемых на этапе технологической подготовки производственных мощностей к выпуску новой продукции. В зависимости от уровня унификации деталей САПР ТП базируются либо на использовании унифицированных (типовых, групповых, модульных) технологических процессов и алгоритмах их доработки, либо на алгоритмах синтеза единичного технологического процесса изготовления изделия-представителя.

В условиях перспективной технологической подготовки производства и инвестиционно-инновационного проектирования обычно требуется осуществление многокритериальной оптимизации проектных технологических процессов по критериям: приведенных затрат, штучного времени обработки, величины капитальных вложений и других факторов, обеспечивающих максимальную экономическую эффективность реконструируемого производства.

Не останавливаясь подробно на типовых методах математического моделирования и оптимизации проектных технологических процессов (линейного и динамического программирования, табличном и комбинаторном моделировании и оптимизации, теории игр и теории статистических решений), рассмотрим более подробно новейшие средства структурной оптимизации проектных технологических процессов с помощью средств искусственного интеллекта [2].

Для упрощения разработки математической модели в виде искусственной нейронной сети предлагается вводить в технологический граф (рис. 1) дополнительные, фиктивные вершины: исходную, являющуюся предком, для вершин графа, соответствующих различным вариантам получения заготовки, и конечную, представляющую собой конечное состояние объекта производства, т. е. готовую деталь. Также необходимо разбить такой многовариантный техно-

логический граф на слои так, что все вершины j -го слоя имеют предков только в $(j-1)$ -м слое и, следовательно, потомков только в $(j+1)$ -м слое. При этом элементы первого слоя не имеют предков, а последнего – потомков.

Критериями структурной оптимизации технологических процессов на таких математических моделях могут быть приняты минимумы: технологической себестоимости – S , штучного времени технологических операций – t и величины капиталовложений в оборудование – K . Для решения поставленной задачи многокритериальной оптимизации [1] введем обобщенный критерий f свертки показателей проектного технологического процесса по правилам многокритериальной оптимизации.

Для ij -й технологической операции его величина определяется по формуле:

$$f_{ij} = \mu_1 \cdot S_{ij}^* + \mu_2 \cdot t_{ij}^* + \mu_3 \cdot K_r^{ij*}, \quad (1)$$

где S_{ij}^* , t_{ij}^* , K_r^{ij*} – нормализованные значения критериев оптимизации на ij -й операции, выполняемой на r -й модели технологического оборудования; μ_1 , μ_2 , μ_3 – положительные числа, характеризующие относительную важность критериев:

$$\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1. \quad (2)$$

Нормализацию критериев технологической себестоимости, штучного времени и капиталовложений, т. е. приведение их к безразмерному виду, осуществляют по формуле:

$$u_{ij}^* = \frac{u_{ij} - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}}, \quad (3)$$

где u_{\min} и u_{\max} – минимальное и максимальное значения критерия u на множестве решений; u_{ij} и u_{ij}^* – текущее и нормализованное значения критерия u на ij -й операции.

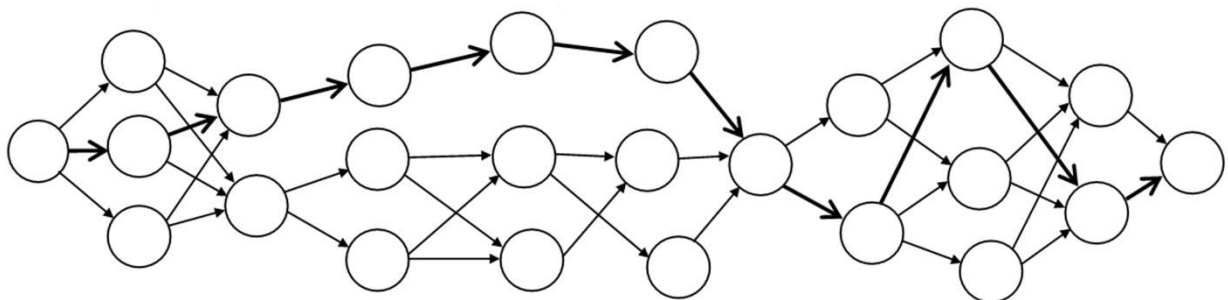


Рис. 1. Пример многовариантного сетевого технологического графа, вершины которого соответствуют вариантам выполнения технологической операции, а дуги определяют возможную последовательность выполнения технологических операций

Целевая функция F такой оптимизационной задачи рассчитывается по формуле

$$F = \sum_{i=1}^{m_j} \sum_{j=1}^n (\mu_1 \cdot S_{ij}^* + \mu_2 \cdot t_{ij}^*) \cdot X_{ij} + \sum_{r=1}^c \left\langle \sum_{i=1}^{m_j} \sum_{j=1}^n \mu_3 \cdot K_r^{ij*} \cdot X_{ij}^r \right\rangle \rightarrow \min, \quad (4)$$

где X_{ij} – вариант выполнения технологической операции с индексом i в j -м слое многовариантного технологического графа ($i=1, m_j, j=1, n$), которая равна единице при включении данного варианта в структуру наилучшего проектного техпроцесса, и нулю в обратном случае; X_{ij}^r – булева переменная, равная 1 при включении ij -го варианта операции технологического процесса, выполняемого на r -й модели оборудования, в структуру наилучшего по выбранным критериям проектного технологического процесса, в обратном случае: $X_{ij}^r=0$; r – индекс, соответствующий модели оборудования ($r=1, c$).

Обозначим

$$\left\langle \sum_{i=1}^{m_j} \sum_{j=1}^n \mu_3 \cdot K_r^{ij*} \cdot X_{ij}^r \right\rangle = \langle h \rangle_r, \quad (5)$$

где $\langle h \rangle_r$ – операция округления величины h до нормализованной стоимости ближайшего большего целого числа необходимых станков r -й модели, т. е.

$$\langle h \rangle_r = z \cdot K_r^*, \quad (6)$$

где z – ближайшее большее целое число станков r -й модели, необходимых для выполнения варианта проектного технологического процесса.

Оно определяется округлением до большего целого отношения величины h и нормализованной стоимости одного станка r -й модели K_r^* :

$$z = \left\langle \frac{h}{K_r^*} \right\rangle. \quad (7)$$

Ограничениями данной оптимизационной задачи являются условия прохождения полного маршрута обработки от начальной до конечной вершины многовариантного технологического графа:

$$\forall j = \overline{1, n} : \sum_{i=1}^{m_j} X_{ij} = 1 \quad (8)$$

и условия невозможности последовательного выполнения вариантов операций в технологическом процессе, если они не связаны дугами:

$$\sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^{m_j} \sum_{\tilde{i}=1}^{m_{(j+1)}} X_{ij} \cdot X_{\tilde{i}(j+1)} = 0, \quad (9)$$

где \tilde{i} – индекс вершин в $(j+1)$ -м слое многовариантного технологического графа, не связанных дугами с i -й вершиной j -го.

В результате оптимизации необходимо найти путь на сетевом графе с минимальным значением многокритериальной целевой функции задачи (4), соответствующий наиболее рациональному варианту проектного технологического процесса.

Для решения задач выбора наиболее предпочтительных решений из множества возможных вариантов теория искусственных нейронных сетей (ИНС) предлагает использовать рекуррентную искусственную нейронную сеть Хопфилда, модифицированная модель которой приведена на рис. 2.

С помощью такой модифицированной искусственной нейронной сети (ИНС) решена задача структурной многокритериальной оптимизации проектных технологических процессов и парка технологического оборудования.

Отличительной особенностью структуры рассматриваемой нейронной сети является наличие обратных связей. Они необходимы для обеспечения циклического функционирования нейронной сети во времени. Циклы вычислений повторяются до момента стабилизации состояния ИНС по параметрам выходных сигналов нейронов.

После запуска нейронная сеть функционирует до момента стабилизации своего состояния в точке экстремума целевой функции системы, рассчитываемой по формуле (4).

Разработанный с использованием данной искусственной нейронной сети программно-методический комплекс позволяет осуществлять многокритериальную оптимизацию проектных технологических процессов по критериям минимума технологической себестоимости, штучного времени и капиталовложений. Апробация результатов разработок на примере оптимизации технологических процессов изготовления прецизионных зубчатых колес для авиационных двигателей подтвердила правомерность приведенных выше обоснований.

2. МЕТОД СТРУКТУРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Научная новизна метода заключается в использовании известных из теории искусственного интеллекта математических методов по-

строения генетических алгоритмов по новому назначению – для оптимизации [3]:

- технологических маршрутов по критерию минимума грузооборота для формирования ведомости технологических маршрутов (расцеховки) изделий;
- маршрутных технологических процессов для оптимального проектирования производственной структуры корпусов, цехов и участков предприятия.

Алгоритм (блок-схема) данного метода представлен на рис. 3.

Здесь фенотип хромосомы представляет собой набор значений номеров цехов, иными словами, маршрут производственного процесса. Например, хромосома $ch = (1\ 4\ 3\ 2)$ для 4 цехов.

На этапе инициализации, формирования исходной популяции, хромосомы проверяются на выполнение условий задачи, которые были опи-

саны выше, тем самым формируются «правильные» хромосомы, удовлетворяющие этим условиям.

Оценивание приспособленности хромосомы в популяции состоит в расчете функции приспособленности, т. е. в расчете суммарного грузооборота $G_i = \sum l_i \cdot m_i$. Селекция хромосом производится методом рулетки. В данном алгоритме используется один генетический оператор – оператор скрещивания (кроссовер). Используется одноточечный кроссовер, суть которого заключается в случайном выборе точки скрещивания (точки кроссовера) или точки разрыва, в которой обе хромосомы делятся на две части и обмениваются ими.

Формирование новой популяции производится за счет объединения родителей и потомков.

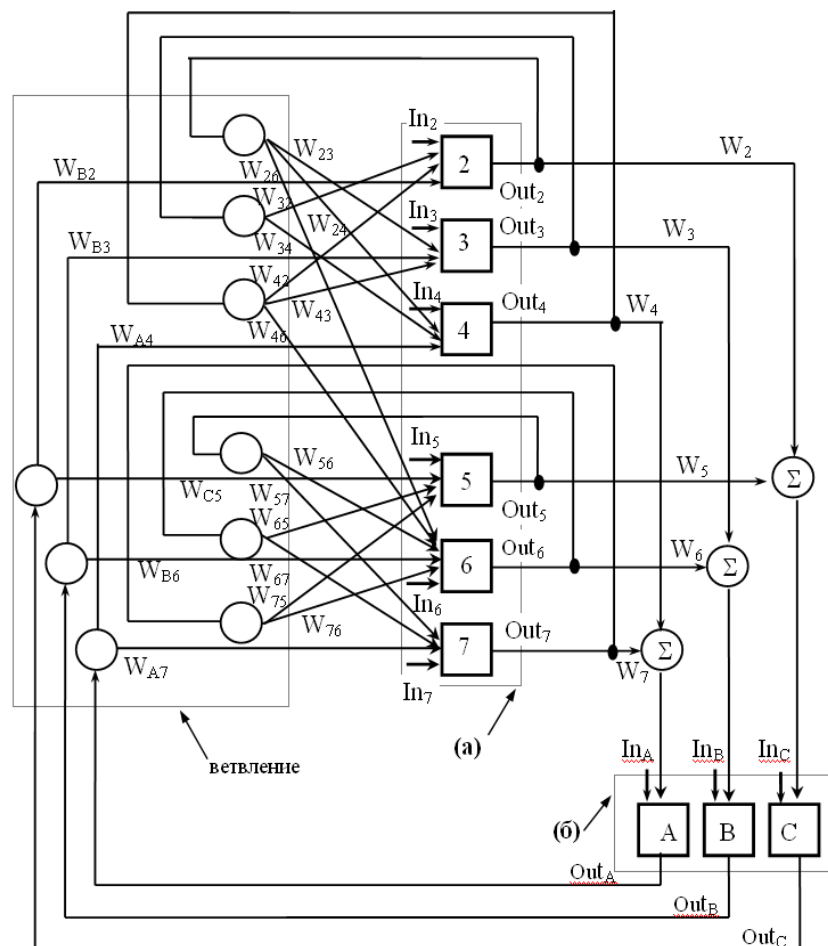


Рис. 2. Архитектура искусственной нейронной сети для оптимизации проектных технологических процессов

Условие остановки работы алгоритма имеет два варианта. Первый вариант остановки алгоритма – достижение ожидаемого оптимального значения, т. е. данная хромосома является наиболее приспособленной из всей популяции. Второй вариант – выполнение заданного количества итерации (поколений). Если условие остановки выполнено, то происходит переход

к завершающему этапу выбора «наилучшей хромосомы».

Для решения данной проблемы разработана программа «ТПП БП», в которой решается ряд задач, связанных с оптимизацией как технологических маршрутов, так и технологических процессов. На рис. 4 представлен интерфейс данной программы, которая выполнена в среде программирования MS Visual Studio 2008.

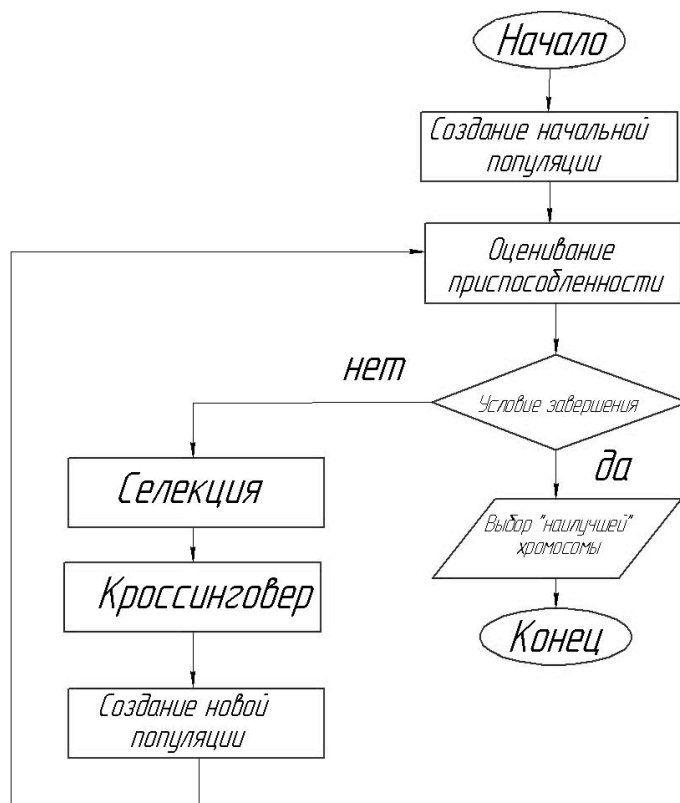


Рис. 3. Блок-схема генетического алгоритма нахождения оптимального технологического маршрута



Рис. 4. Интерфейс программы «ТПП БП»

При нажатии кнопки «Технологические маршруты» появляется окно программы (рис. 5), которое позволяет производить оптимизацию технологических маршрутов с помощью логико-генетического метода (генетического алгоритма, оптимизирующего технологические маршруты на графах).

При апробировании данной программы на примере оптимизации производства модуля воздухо-воздушного теплообменника (ВВТ) были получены данные, которые приведены в таблице.

Результаты оптимизации технологических маршрутов производства деталей модуля ВВТ

Детали	Расстояние, км		
	до	после	%
Трубка ВВТ	59,860	11,216	81,263
Фланец	48,323	5,843	87,908

Такие расчеты позволили создать предметно-замкнутое (специализированное) производство названных изделий, что резко сократило встречные грузоперевозки между площадками предприятия и обеспечило получение экономического эффекта более 38,0 млн руб.

По результатам оптимизации технологических маршрутов по критерию минимума грузо-

оборота можно приступать к решению задач по оптимизации технологических процессов. При этом приоритетными критериями оптимизации разработки маршрутных карт проектных технологических процессов выступают показатели ресурсосбережения в цехах.

Для осуществления структурной оптимизации технологических процессов, также как и в рассмотренном выше случае применения искусственных нейронных сетей, наиболее приспособлены сетевые модели.

Для решения задачи многокритериальной оптимизации в проектах реконструкции и технического перевооружения цехов приоритетным критерием является фондосбережение, так как «бережливое» производство предполагает минимальные капиталовложения в его создание.

Для автоматизации решения задачи многокритериальной оптимизации фондосберегающего технологического процесса на базе построения многовариантной структурной модели перспективных технологических процессов предлагается также, как и для разработки межцеховых технологических маршрутов, использовать генетические алгоритмы, реализуемые в среде программирования MS Visual Studio 2008.

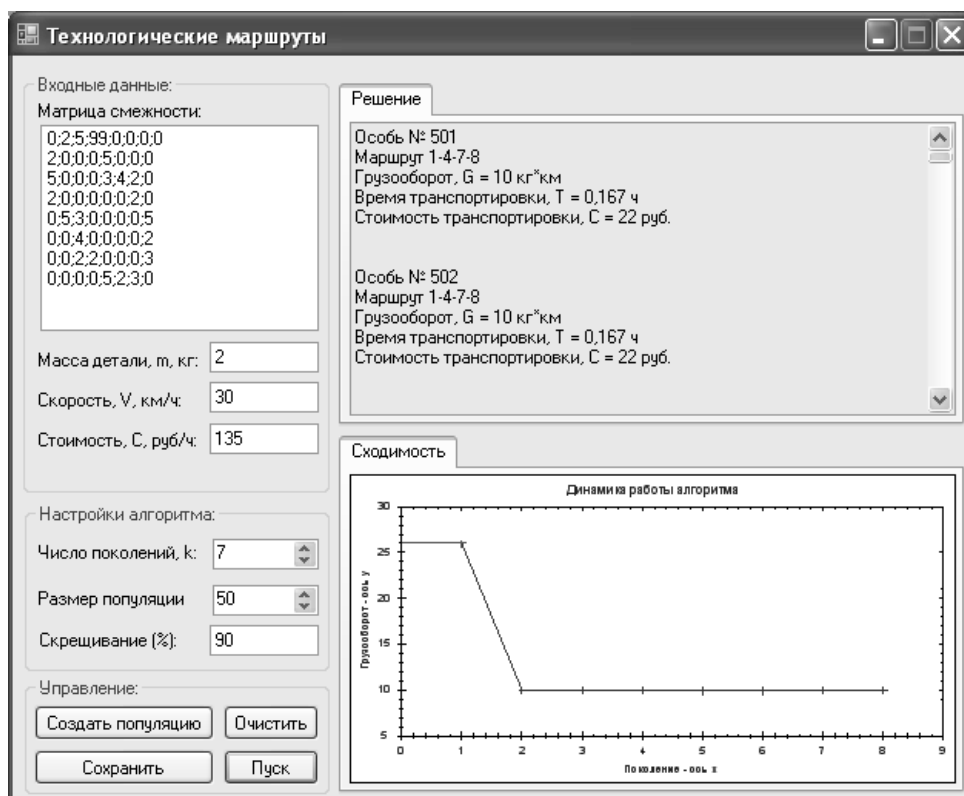


Рис. 5. Пример работы программы оптимизации технологических маршрутов

В данном случае проектирования с помощью логико-генетического метода оптимальных фондосберегающих технологических процессов критерии оптимизации должны минимизировать как величины производственных фондов, определяемые:

- по сумме капитальных вложений в запасы основных средств (оборудования, сооружений, устройств, зданий, дорогостоящих средств технологического оснащения),
- по сумме запасов оборотных средств¹ (материалов, топлива, покупных полуфабрикатов, малоценной оснастки, заделов деталей, расходов будущих периодов),
- так и величины использования фондов времени работы оборудования и рабочих – наиболее рационально эти фонды времени используются при минимизации штучного или штучно-калькуляционного времени, проставляемых в маршрутных картах технологических процессов.

Таким образом, в математической модели целевой функции логико-генетического метода, при многокритериальной оптимизации фондосберегающих технологических процессов, выбираемых и «ядра решений», максимально приближенного к минимуму приведенных затрат, необходимо в первую очередь учесть следующие локальные критерии:

- капиталовложения в оборудование, минимизация этого критерия ($K \rightarrow \min$) позволяет обеспечить ресурсосбережение в использовании активной части основных производственных фондов по величине балансовой стоимости оборудования;
- площадей, минимизация этого критерия ($\Pi \rightarrow \min$) позволяет обеспечить ресурсосбережение в использовании пассивной части основных производственных фондов зданий и сооружений;
- штучного и штучно-калькуляционного времени, минимизация этого критерия

¹ Для технологического процесса изготовления одного и того же изделия по различным вариантам в данном случае условно принимается, что цеховые запасы оснастки, инвентаря, материалов, топлива, покупных изделий, заделов, расходы будущих периодов, которые определяют постоянную часть прямых капиталовложений на уровне цеха, а не на уровне производственных групп технологического оборудования участков, есть величина, условно постоянная, и в расчетах проектных технологических процессов не участвует.

($t_{ш-к} \rightarrow \min$) обеспечивает наибольшую производительность труда и возможности фондосбережения для дозагрузки рабочих и оборудования за счет перевода на эти станки (оборудование, средства технологического оснащения) технологических операций, выполнявшихся ранее на физически изношенном и морально устаревшем оборудовании, которое подлежит высвобождению (списанию, модернизации, передаче во вспомогательные производства, утилизации или сдаче в металлолом).

Дополнительными критериями оптимизации при разработке фондосберегающих технологических процессов могут быть показатели технического уровня технологических процессов, которые характеризуют уровень интенсификации использования оборудования – это коэффициент загрузки оборудования, коэффициент сменности работы оборудования, уровень автоматизации оборудования и коэффициент выбытия физически изношенного и морально устаревшего оборудования, который используют в проектах реконструкции и технического перевооружения.

При разработке структурной многовариантной модели проектного технологического процесса в виде сетевого графа (рис. 1) необходимо иметь в виду, что базовый технологический процесс, подлежащий замене, – это рабочий (базовый) технологический процесс, который ранее был реализован в цехе. Значения его параметров в вершинах графа определены существующим парком технологического оборудования, существующими режимами обработки, затратами на выполнение данного технологического процесса. Дополнительные вершины графа, которые предусматривают изменение структуры технологических операций и обновление парка оборудования, определяют, исходя из возможностей выбора и использования высоких технологий, новых средств технологического оснащения и в первую очередь нового парка технологического оборудования.

Обобщенный критерий оптимизации в данном случае определен с помощью применения аддитивного критерия, целевую функцию которого получают путем сложения нормированных значений частных критериев:

$$f_i = \sum_{i=1}^n \mu_i \frac{u_i}{u_i^0} = \sum_{i=1}^n \mu_i u_i^* \rightarrow \max(\min), \quad (10)$$

где n – количество объединяемых частных критериев; μ_i – весовой коэффициент i -го частного критерия; u_i – численное значение i -го частного

критерия; u_i^0 – i -й нормирующий делитель; u_i – нормированное значение i -го частного критерия.

Использование аддитивной свертки² вместо взвешенного суммирования обладает следующими преимуществами:

- свертка переводит абсолютные значения в относительные, что позволяет сравнивать разнородные качества;
- свертка приводит значения критериев к диапазону [0;1] абсолютной шкалы, что позволяет осуществлять в ней все допустимые алгебраические операции;
- указание доли критерия от его максимального значения позволяет сопоставлять оценки, полученные в разных шкалах.

Характерным свойством аддитивной свертки является то, что максимальную оценку с ее помощью получают те альтернативы, которые имеют больше критериев, близких по значениям к максимальным (при одинаковых средних у всех альтернатив). При изменении направления оптимизации приоритеты меняются на противоположные.

Для i -й технологической операции величина аддитивного критерия определяется по формуле:

$$f_i = \mu_1 \cdot K + \mu_2 \cdot \Pi + \mu_3 \cdot t \rightarrow \min, \quad (11)$$

где K , Π , t – названные выше нормализованные приведенные значения: капиталовложений в оборудование (K), площади (Π) и штучно-калькуляционного времени (t) на i -й технологической операции, выполняемой на r -й модели технологического оборудования.

Нормализация критериев, т. е. приведение их к безразмерному виду, осуществляется нормализацией методом сравнения по формуле:

$$u_i^* = \frac{u_i}{u_{\max}}, \quad (12)$$

где u_{\max} – максимальное значения критерия u на множестве решений; u_i и u_i^* – текущее и норма-

лизованное значения критерия u на i -й операции, μ_1 , μ_2 , μ_3 – положительные числа, характеризующие относительную важность критериев:

$$\mu_1 + \mu_2 + \mu_3 = 1. \quad (13)$$

Оценивание функции приспособленности в генетическом алгоритме осуществляется следующим образом: чем больше значение функции приспособленности, тем больше сектор на колесе рулетки и вероятность выбора данной хромосомы в качестве родителя.

В данном генетическом алгоритме для решения задачи оптимизации используется одноточечный кроссовер, суть которого заключается в случайном выборе точки скрещивания или точки разрыва, в которой обе хромосомы делятся на две части и обмениваются ими. Это временная популяция, состоящая из хромосом, отобранных в результате селекции и предназначенных для дальнейших преобразований оператором скрещивания с целью формирования новой популяции потомков.

Условие остановки работы алгоритма имеет два варианта. Первый вариант остановки алгоритма – достижение ожидаемого оптимального значения, т. е. данная хромосома является наиболее приспособленной из всей популяции. Второй вариант – выполнение заданного количества итерации (поколений). Если условие остановки выполнено, то происходит переход к завершающему этапу выбора «наилучшей хромосомы».

Таким образом, данная программа позволяет оптимизировать проектные технологические процессы на основе использования логико-генетического метода по критериям капиталовложений в оборудование, площадей и штучного времени.

По полученным результатам системно-структурного анализа проектных технологических процессов выявлен ряд зависимостей между критериями оптимизации фондосберегающих технологий (рис. 6). Эти зависимости позволяют определить Парето-оптимальные фондосберегающие технологические процессы для анализа возможностей применения высоких технологий в проектах цехов «бережливого» производства, а также на уровне создания производственных участков и производственных корпусов машиностроительных предприятий.

² Относительные показатели технического уровня (коэффициент сменности работы оборудования, коэффициент загрузки оборудования, коэффициент выбытия физически изношенного и морально устаревшего оборудования) при интенсификации использования активной части основных производственных фондов должны стремиться к максимуму, а абсолютные показатели капиталовложений, площади и штучно-калькуляционного времени – к минимуму.

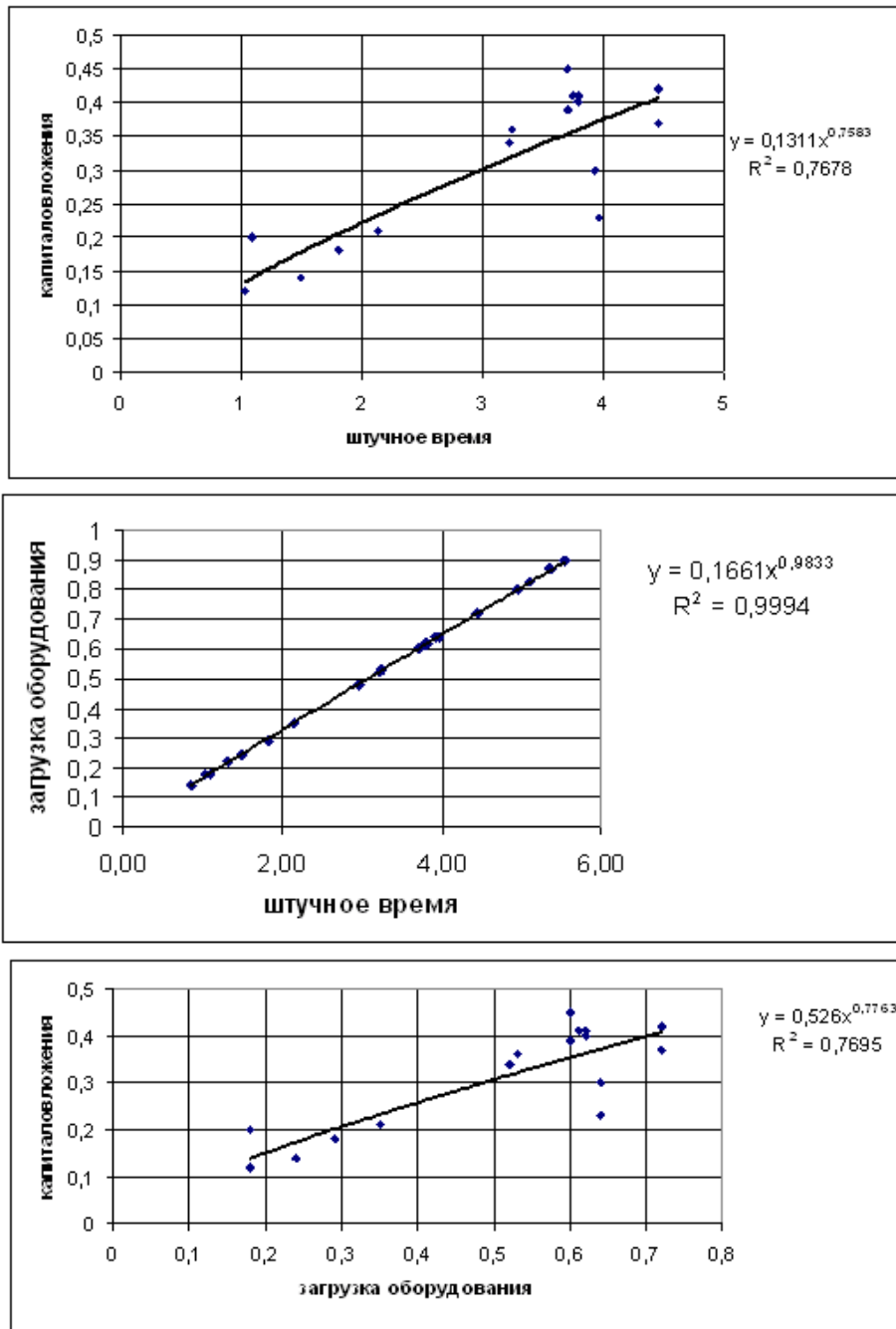


Рис. 6. Линии регрессии зависимостей технико-экономических показателей проектных технологических процессов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный нейроструктурный метод многокритериальной оптимизации проектных технологических процессов позволяет определять наиболее рациональные парки технологического оборудования в проектах нового строительства, расширения, реконструкции и технического перевооружения производства. Внедре-

ние результатов разработок на примере оптимизации технологических процессов и разработки проекта технического перевооружения цеха изготовления прецизионных зубчатых колес для авиационных двигателей подтвердила правомерность приведенных выше обоснований.

Разработанные на основе логико-генетического метода математические модели и алго-

ритмы позволили оптимизировать технологические маршруты, проектные технологические процессы, компоновки корпусов и планировки оборудования цехов авиадвигателестроительного производства.

Проведенная оценка эффективности применения логико-генетического метода при внедрении результатов в производство показала, что использование метода при создании производства модуля ВВТ на ОАО «УМПО» позволило:

- сократить транспортные грузопотоки на 83 %;
- уменьшить время производственного цикла изготовления модуля ВВТ на 37 %;
- получить годовой экономический эффект от реализации проекта создания производства модуля ВВТ 38,34 млн руб.

В проекте по созданию комплекса производства роторов турбин и компрессоров ОАО «УМПО» на основе нового метода оптимизации можно снизить время транспортировки грузов на 87 %, а величину транспортных грузопотоков на 88 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селиванов С. Г., Гузаиров М. Б. Системотехника инновационной подготовки производства в машиностроении. М.: Машиностроение, 2012. 568 с.
2. Рекуррентные сети и методы оптимизации проектных технологических процессов в АСТПП

машиностроительных производств // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 15, № 5(45). С. 36–46.

3. Использование методов искусственного интеллекта в технологической подготовке машиностроительного производства // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 1(36). С. 87–97.

ОБ АВТОРАХ

Селиванов Сергей Григорьевич, проф. каф. технологии машиностроения. Дипл. инженер по автоматизации и комплексной механизации машиностроения (УАИ, 1970). Д-р техн. наук по технологии машиностроения (Мосстанкин, 1991). Иссл. в обл. технологической подготовки, реконструкции, организации производства.

Никитин Виталий Викторович, асп. той же каф., менеджер Уфимск. моторостроительн. произв. объединения (ОАО УМПО). Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. технологической подготовки, реконструкции, организации производства.

Селиванова Марина Валерьевна, доц. каф. вычислительной техники и защиты информации. Дипл. инженер по технологии машиностроения (УГАТУ, 1997). Канд. техн. наук по технологии машиностроения (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. нейросетевых алгоритмов, методов оптимизации, технологической подготовки производства.