УДК 621.7.08

С. Г. Селиванов, О. А. Гаврилова, С. Н. Поезжалова, В. В. Никитин

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЕКТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, Россия

В статье рассматриваются вопросы разработки новых технологических процессов, которые, как правило, разрабатывают в рамках инновационных проектов, которые включают в себя систему мероприятий, обеспечивающих в течение заданного периода времени создание, производство и реализацию нового вида продукции или технологии с целью получения прибыли или иного полезного эффекта. Рассматриваются понятия «проектный» и «перспективный технологический процесс», которые весьма близки друг другу, так как перспективная технология внедряется без указания способа или метода реализации нововведения, а проектная технология – с указанием метода внедрения посредством разработки и осуществления технологической части проектов нового строительства, расширения, реконструкции и технического перевооружения. Акцентируется внимание на новых технологических процессах, которые разработаны на основе применения высоких и критических технологий, и которые внедряются на производстве в рамках инновационных проектов, - их также можно называть проектными. В статье также рассмотрены методы моделирования и оптимизации, которые можно применять при разработке проектных технологических процессов в машиностроительной отрасли. В основе рассмотренных методов лежит применение средств искусственного интеллекта, таких как генетические и нейросетевые алгоритмы. Цель данной публикации определяется теоретическим обобщением методов оптимизации проектных технологических процессов и разработкой новых методов многокритериальной оптимизации вышеназванных технологических процессов, основанных на применении методов искусственного интеллекта. Практическая полезность разработок подтверждена проектами технического перевооружения и реконструкции машиностроительного производства.

Ключевые слова: проектный технологический процесс, модель-граф, рекуррентные сети, генетический алгоритм, ресурсосберегающий технологический процесс, критерии оптимизации, инновационная деятельность.

ВВЕДЕНИЕ

Проектная технология, разрабатываемая на производстве, может рассматриваться в качестве комплекта проектной технологической документации, который предназначается для организации и выполнении работ при создании нового производства (например, строительства нового или расширения существующего завода) или реконструкции (технической реконструкции) и технического перевооружения действующего предприятия. В этом случае базовые рабочие технологические процессы (ТП), т. е. ТП, выполняемые в соответствие с рабочей документацией, в ходе реконструкции или технического перевооружения должны

актуализироваться (пересматриваться) и заняться новыми, более прогрессивными с применением современных методов обработки поверхностей.

Термины «проектный» и «перспективный» технологический процесс друг с другом соседствуют. Перспективный техпроцесс внедряется на производстве без указания самого способа внедрения инновации, а проектный техпроцесс – с указанием способа внедрения, а также с конкретизацией способа выполнения технической и технологической части проектов. Вновь разработанные технологические процессы, создаваемые и внедряемые в рамках инновационных проектов на промышленных предприятиях, тоже можно называть проектными [1]. Основной характеристикой, которая отличает директивные техпроцессы от перспективных, является экономический эффект. При внедрении директивного технологического процесса, который направлен на повышение конкурентоспособности и качества изделий, он проявляется, во-первых, в сфере эксплуатации и ремонта уже выпущенного изделия, и во-вторых, в сфере продаж изделия за счет повышения их (продаж) объемов улучшенной в процессе производства или новой конструкции. При внедрении на предприятии перспективных технологических процессов экономический эффект получается, в первую очередь, от сбережения ресурсов при производстве изделия и, во вторую очередь, от повышения объема продаж, в следствии уменьшения стоимости изделия [1].

Предлагается рассмотреть ресурсосбрегеающие (материало-, трудо-, энерго- и фондосберегающие) проектные и перспективные технологические процессы, реализуемые на машиностроительном производстве, которые можно оптимизировать, применяя методы математического моделирования и искусственного интеллекта.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование проектных технологических процессов включает в себя построение непосредственно самой модели – графа технологического процесса (Рисунок 1), а также предусматривает процесс выбора наиболее рационального (оптимального) варианта из всей совокупности возможных проектно-технологических решений. Такой процесс, например, можно реализовать, взяв за основу применение теории графов, методов линейного или динамического программирования, элементы теории игр, теории статистических решений, а также для решения поставленной задачи можно применить методы машинного обучения в виде рекуррентных нейронных сетей или генетических алгоритмов и т.д.

Каждый путь от исходной вершины до завершающей вершины на построенной математической модели технологического процесса – на многовариантном графе – характеризует конкретный вариант

технологического процесса. Каждый такой вариант технологического процесса отличается от других, но следует учесть, что при реализации любого из вариантов технологий, представленных на графе, обязательно выполняются требования, заданные конструкторским чертежом. Варианты технологического процесса могут различать по параметрам разного уровня, например, по технико-экономическими показателям, уровню автоматизации, по производительности и т.д.

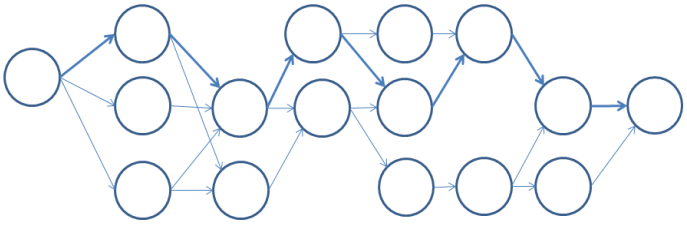

Рисунок 1– Пример построения многовариантного технологического графа для моделирования технологических процессов (круг – вариант выполнения технологической операции, стрелка – последовательность их выполнения)

Дальнейшая оптимизация модели технологического процесса (Рисунок 1), а также выбор различных вариантов технологических операций базируются на включении в модель наукоемких методов обработки поверхностей, которые реализуются на современном производительном оборудовании; экономически и технически эффективной оснастки, и других инновационных компонентов [2]. Построив такой технологический граф, можно получить множество вариантов технологических процессов, в котором нужно найти наиболее рациональные (оптимальные) в заданных условиях, с учетом необходимых критериев (например, с учетом минимизации затрат или времени на изготовление детали, коэффициента использования материала или других выбранных критериев).

Для выбора наилучшего варианта технологического процесса в заданных условиях [2], можно, например, использовать рекуррентные нейронные Элмана или Джордана (Рисунок 2), т. к. алгоритмы, лежащие в основе работы указанных сетей, позволяют «запоминать» последовательности выполняемых операций и анализируют каждый следующий вариант операции с учетом предыдущего, что является важным при решении поставленной задачи.

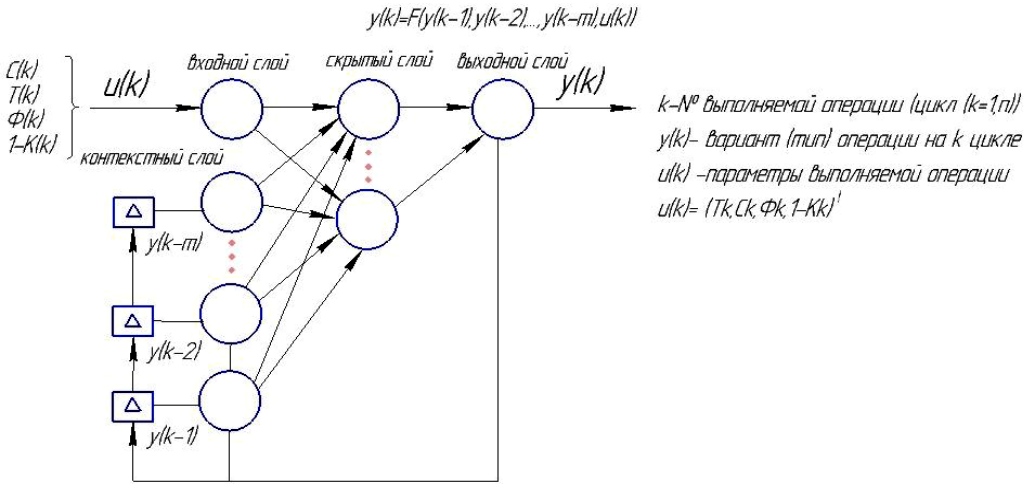

Рисунок 2- Архитектура рекуррентной сети для решения задачи многокритериальной оптимизации технологических процессов

Для осуществления структурной оптимизации технологического процесса предполагается использование модели-графа, созданного, исходя из применения базовой технологии изготовления детали на производстве, и доработанного на основе анализа других вариантов технологических операций и возможной их реализации в рамках выполнения технологического процесса [2]. Новые вершины графа, добавленные в результате анализа, предполагают изменение плана обработки, обновление парка оборудования, применение новых технологий и методов обработки поверхностей детали; внедрение современных средств технологического оснащения для высокоскоростной обработки и т. п. После формирования модели-графа можно переходить к выбору наиболее рационального (оптимального) варианта проектного или перспективного технологического процесса. Для решения такой задачи должна быть определена функция цели (1), где T_i, C_i, $Ф_i$, K_i (количество переменных может быть больше) – параметры (критерии), с учетом которых осуществляется оптимизация, а μ_i – веса критериев, обозначающие «значимость» каждого из критерия оптимизации, $I=\{i_1, i_2, \ldots i_n\}$ – множество номеров на пути маршрута обработки детали, а n – количество слоев модели-графа.

$$f = \sum_{i \in I} f_i = \sum_i [\mu_1 \cdot Ti + \mu_2 \cdot Ci + \mu_3 \cdot Фi + \mu_4 \cdot (1 - Ki)] \to \min \qquad (1)$$

В качестве параметров для оценки технологического процесса могут быть использованы различные показатели, в зависимости от цели, которая преследуется в рамках решения поставленной задачи. В данном случае учитываются: себестоимость изготовления деталей – C; время изготовления деталей – T; фондоемкость – Ф, – учитывается как

капиталовложения в оборудование, площади и оснастку, а также коэффициент использования материала – К. Значение функции цели в данном случае стремится к минимуму.

Для применения нейросетевых методов для многокритериальной оптимизации технологических процессов необходимо выполнить свертку критериев оптимизации. При решении данной задачи наиболее удобно применять линейную свертку. Для начала нужно определить для уравнений (2) и (3) веса приоритетности критериев, значения которых находятся в интервале (0,1) [3]:

$$\xi^n = \frac{\left(\varepsilon^n - \varepsilon^n_{\min}\right)}{\left(\varepsilon^n_{\max} - \varepsilon^n_{\min}\right)}, \qquad (2)$$

где ξ^n – величина *n*-го критерия, приведенная к безразмерному виду;

ε^n – значение *n*-го критерия $n \in [1, m]$;

$\varepsilon^k_{\min}, \varepsilon^k_{\max}$ – минимальное и максимальное из всех возможных значений *n*-го критерия.

$$\varepsilon_\Sigma = \sum_{i=0}^{m} \mu_i \cdot \xi^n, \qquad (3)$$

где μ_i – веса, которые определяет эксперт.

Помимо нейронных сетей, для оптимизации и выбора наиболее рационального варианта проектной или перспективной технологии, а также для распределения деталей между цехами можно применять, например, генетические алгоритмы [4]. Схема реализации такого подхода представлена на рисунке 3. На этапе инициализации, формирования исходной популяции, хромосомы проверяются на выполнение условий задачи, которые были описаны выше, тем самым формируются «правильные» хромосомы, удовлетворяющие этим условиям. Оценивание приспособленности хромосомы в популяции состоит в определении значения функции приспособленности, например, в вычислении общего грузооборота при разработке ведомости технологических маршрутов (расцеховки).

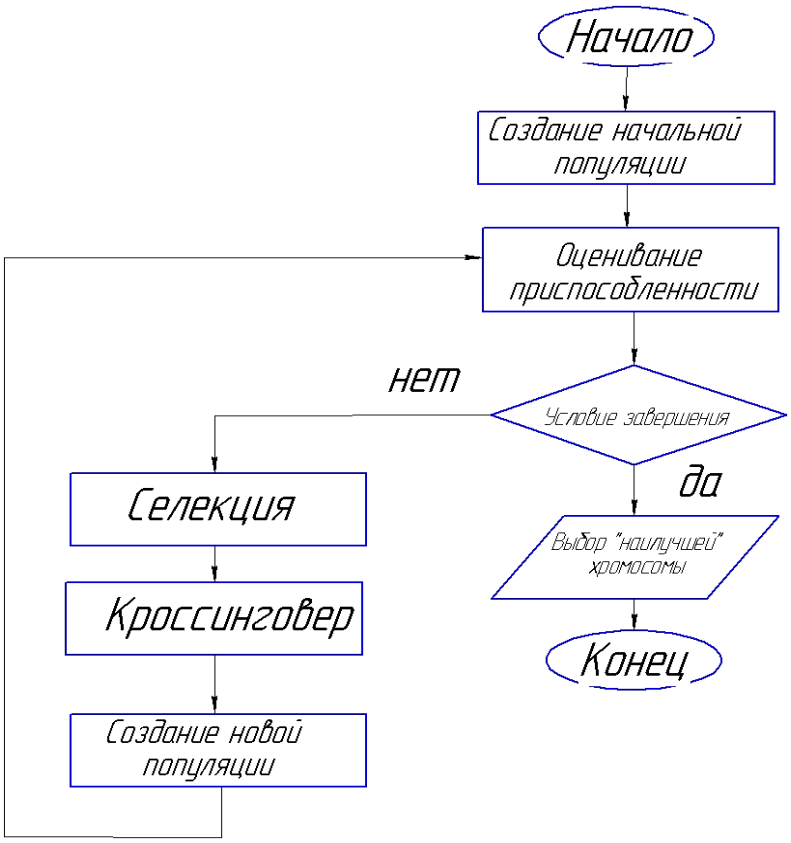

Рисунок 3 – Схема работы генетического алгоритма для выбора оптимального технологического маршрута

Селекция хромосом может производиться, например, методом рулетки, который предполагает каждой хромосоме поставить в соответствие сектор колеса рулетки, размер которого выбирается согласно значению функции приспособленности выбранной хромосомы. На представленной схеме работы генетического алгоритма (Рисунок 3) видно, что в рассматриваемом случае используется один оператор – оператор скрещивания. Здесь применяется одноточечный кроссинговер, суть которого заключается в случайном выборе точки скрещивания, где хромосомы делятся на части и «обмениваются» ими. Создание новой популяции происходит за счет объединения «потомков» и «родителей». Остановка алгоритма может быть реализована в двух случаях. В одном случае остановка работы алгоритма может осуществлять по достижении ожидаемого оптимального значения, то есть, когда найдена самая приспособленная хромосома из всей популяции. В другом случае остановка алгоритма происходит после прохождения заданного количества итерации. Если выбранное условие остановки алгоритма выполнено, то осуществляется переход к конечному этапу подбора «наилучшей хромосомы» [4].

Для решения задачи оптимизации расцеховок и оптимизации технологических маршрутов с помощью генетических алгоритмов разработана программа «ТПП БП». На рисунках 4 и 5 представлены окна этой программы. Программа позволяет оптимизировать процесс распределения деталей (изделий) между производственными цехами, оптимизировать сами технологические процессы изготовления деталей, рационализировать компоновки технологического оборудования в цехе, а также рассчитать сроки реконструкции производственных площадок и построить графики. Программный модуль «Технологические маршруты» (Рисунки 4 и 5) позволяет выполнить оптимизацию ведомостей технологических маршрутов и производства деталей на машиностроительном предприятии. По итогам проведения таких работ можно приступать к решению задачи оптимизации технологических процессов. При этом приоритетными критериями оптимизации разработки маршрутных карт проектных технологических процессов выступают как отдельные показатели ресурсосбережения, так и суммарные значения затрат в цехах «бережливого производства». Для решения задачи многокритериальной оптимизации в проектах реконструкции и технического перевооружения производственных цехов нередко приоритетным критерием является фондосбережение, так как современное «бережливое» производство и *lean*-технологии предполагают минимальные капиталовложения в его создание.

Работу данного метода для решения задачи оптимизации проектных технологических процессов можно представить на примере производственной задачи. Критериями в данном случае являются величины производственных фондов, определяемые по сумме капитальных вложений в запасы основных средств, а также по сумме запасов оборотных средств. Они должны быть минимизированы. При решении задачи также должны быть учтены значения использования фондов времени работы оборудования и самих рабочих. Наиболее рационально фонды времени используются при

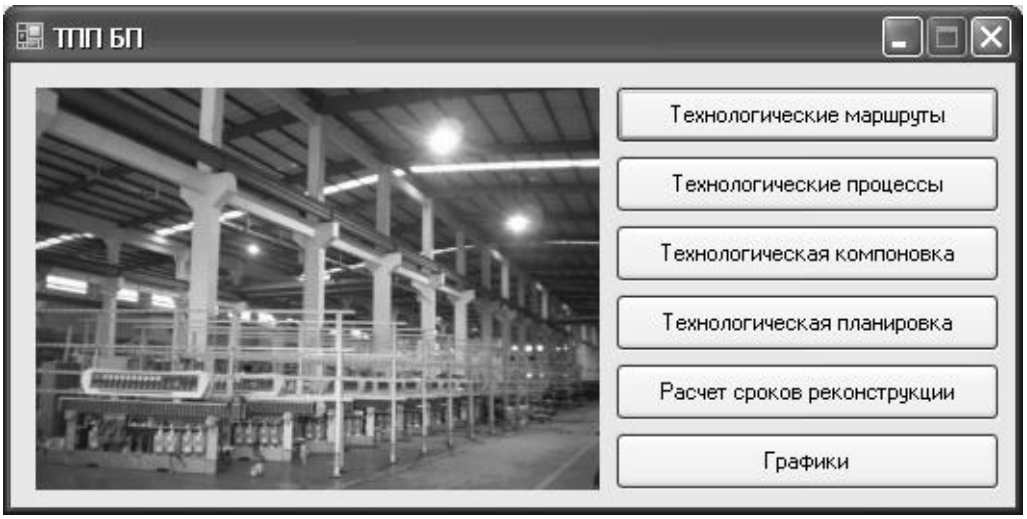

Рисунок 4 – Интерфейс программы «ТПП БП»

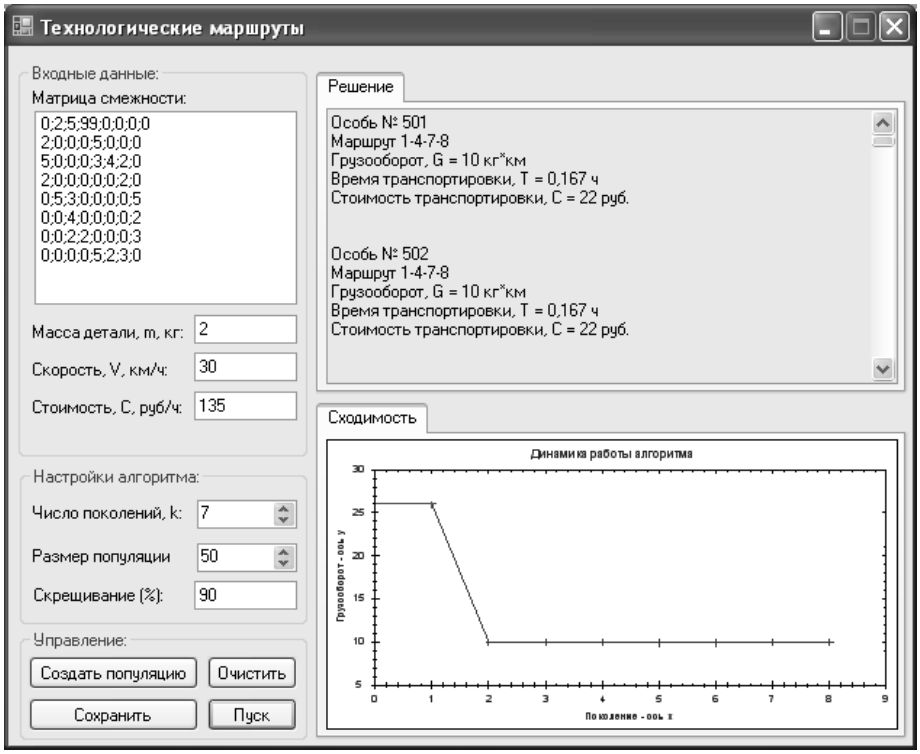

Рисунок 5 – Пример работы программы для оптимизации технологических маршрутов

минимизации штучного (штучно-калькуляционного) времени, которые указываются в маршрутных и операционных картах технологических процессов [4].

Таким образом, необходимо в качестве входных параметров для решения задачи оптимизации выбирать, в первую очередь, капиталовложения в оборудование; площади, на которых размещается это оборудование; штучное время. Другие показатели могут быть также дополнительно учтены в зависимости от целей и постановки задачи.

Дополнительными критериями для осуществления оптимизации (при разработке фондосберегающих технологических процессов) могут стать показатели технического уровня, которые определяют степень интенсивности использования оборудования (характеризуют коэффициенты загрузки и сменности оборудования), уровень автоматизации и показатели, учитывающие отказ от физически изношенного и устаревшего оборудования, которые рассчитывают в проектах по реконструкции и техническому перевооружению производства.

РЕЗУЛЬТАТЫ

По полученным результатам применения генетических алгоритмов был выявлен ряд зависимостей между критериями оптимизации при проектировании фондосберегающих технологических процессов (Рисунок 6). Эти зависимости дают возможность определить Парето-оптимальные варианты техпроцессов для анализа возможностей применения высоких технологий в проектах создания цехов «бережливого» производства, а также на уровне создания производственных участков и корпусов на машиностроительных предприятиях.

Также по результатам оптимизации проектных технологических процессов (на примере разработки технологических процессов для зубчатых колес маслоагрегатов авиационных двигателей) были получены распределения Пирсона (Рисунок 7). Эти распределения подтверждают, что любой из вариантов технологических процессов, который получен в процессе оптимизации с применением нового подхода, и который находится в области приближенной к наиболее рациональному (оптимальному) варианту, может быть использован в производстве для изготовления деталей. Однако технологические процессы, приближенные к такому наилучшему варианту, являются более предпочтительными для дальнейшей разработки комплекта документации проектного технологического процесса. Применение рекуррентных нейронных сетей позволяет не только сокращать трудоемкость работ при внедрении автоматизированных систем технической подготовки производства для выпуска новой продукции, но и находить Парето-оптимальные решения для их внедрения на производстве.

ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из перспективных направлением работ по инновационному проектированию сегодня является интеллектуализация процессов управления при разработке проектных, перспективных и директивных технологических процессов на базе применения современных средств и методов интеллектуализации производственных задач и элементов машинного обучения. При разработке структурной многовариантной

модели-графа технологического процесса (Рисунок 1) необходимо иметь в виду, что базовый технологический процесс, который предстоит заменить, – это рабочий технологический процесс, который реализуется в цехе. Значения его параметров в вершинах графа определены существующим парком технологического оборудования, существующими режимами обработки поверхностей

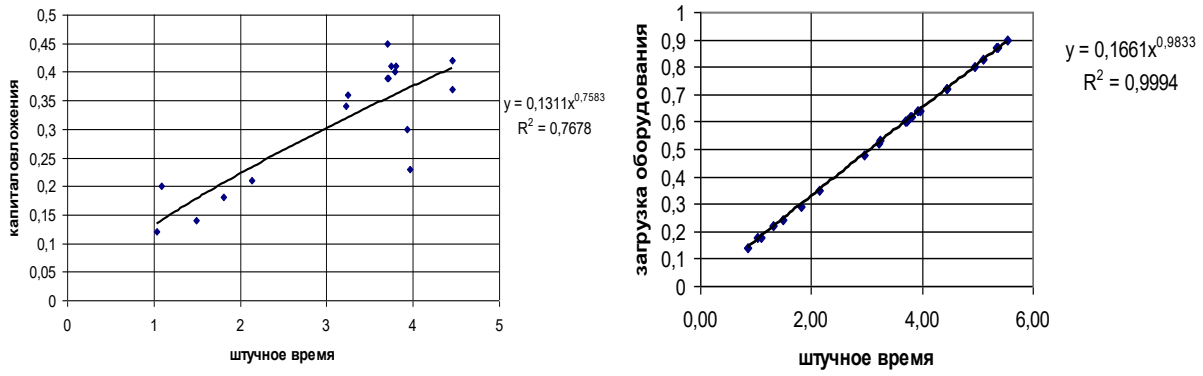

Рисунок 6 – Регрессионные зависимости технико-экономических показателей проектных технологических процессов

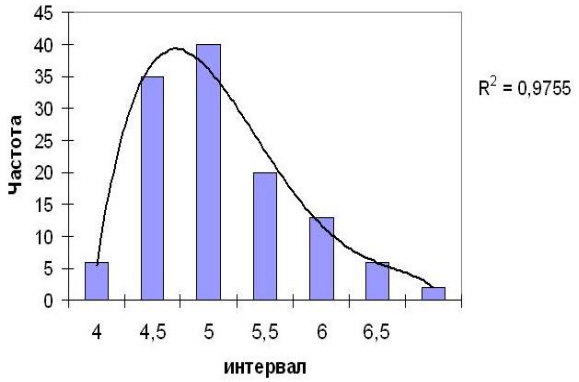

Рисунок 7 – Пример распределения Пирсона по времени обработки детали типа «шестерня» на технологических операциях

деталей, текущими затратами на выполнение операций данного технологического процесса. Дополнительные вершины модели, которые также предусматривают изменение структуры техпроцесса, определяют, исходя из возможностей выбора и внедрения на производстве наукоемких технологий. При использовании генетических алгоритмов для оптимизации проектного технологического процесса и выбора фондосберегающей технологии нужно учитывать, что существуют различные методы селекции хромосом (пропорциональный отбор, турнирный отбор, отбор усечением, рулеточный отбор). В рассматриваемой статье используется наиболее популярный метод – метод рулетки. Принимая во внимание то, что в инновационных проектах и

функциональных моделях автоматизированных систем технической подготовки производства центральное место занимает разработка новых технологических процессов (технологических инноваций), рассматриваемая в данной публикации задача оптимизации проектных технологических процессов с помощью методов искусственного интеллекта и элементов машинного обучения относится к весьма актуальным разработкам.

Таким образом, с помощью совместного применения модели-графа, рекуррентных нейронных сетей и генетических алгоритмов можно определить вариант наиболее рационального (оптимального в конкретных условиях) технологического процесса изготовления деталей и представить его в виде маршрутной карты проектного или перспективного технологического процесса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение конкурентоспособности изделий на современном этапе требует от предприятий значительного внимания к постановке на производство новой продукции, а также к разработке и внедрению систем «бережливого» производства. Такая постановка задачи предусматривает применение современных методов разработки инновационных технологий в рамках автоматизированных систем технической подготовки производства, в том числе с применение методов машинного обучения. Автоматизация и применение современных методов интеллектуализации при решении прикладных задач в области инновационного проектирования позволяет существенно повысить не только технический уровень проектных разработок, но также их экономическую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Селиванов С. Г., Гузаиров М. Б., Кутин А. А. Инноватика: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 2008. 721 с.
2. Селиванов, С. Г. Вероятностно-рекуррентный метод оптимизации перспективных технологических процессов в АСТПП авиадвигателестроительного производства/ С. Г. Селиванов, Л. Р. Черняховская, О. А. Бородкина // Вестник УГАТУ. – 2012.Т.16 – №2 (48) – С. 81-90.
3. Рекуррентные нейронные сети и методы оптимизации проектных технологических процессов в АСТПП машиностроительного производства / С. Н. Поезжалова [и др.] // Вестник УГАТУ. – 2011.Т.15 –
   № 5 (45) – С. 36-46.

4. Селиванов, С. Г. Логико-генетический метод оптимизации АСТПП авиадвигателестроения в условиях управления проектами «бережливого» производства/ С. Г. Селиванов, В. В. Никитин // Вестник УГАТУ. – 2012. Т.16 – №2 (48) – С.63-69.

S.G. Selivanov, O.A. Gavrilova, S.N. Poezjalova, V.V. Nikitin

OPTIMIZATION OF DESIGN TECHNOLOGICAL PROCESSES IN INNOVATIVE ACTIVITY

Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russia

The article deals with the development of new technological processes, which are created within the framework of innovative projects. Innovative projects include a system of measures that ensure the creation, production and sale of a new type of product or technology for the purpose of generating profit or other useful effects. In the article the concepts "project" and "perspective technological process" are considered, which are close in meaning. A promising technology is introduced without indicating the method or method for implementing the innovation, and the design technology - with its indication by developing the technological part of the new construction, expansion, reconstruction and technical re-equipment projects. Attention is focused on new technological processes, which are developed on the basis of high and critical technologies, and are introduced in production within the framework of innovative projects. The article also discusses the methods of modeling and optimization, which can be used in the development of design technological processes in the machine-building industry. The methods considered are based on the use of artificial intelligence tools, such as genetic and neural network algorithms. The purpose of this publication is a theoretical generalization of methods for optimizing the design of technological processes and the development of new methods for multi-criteria optimization of technological processes based on the methods of artificial intelligence. The practical usefulness of the developments is confirmed by the implementation of projects of technical re-equipment and reconstruction of machine-building production.

Keywords: design technological process, model-graph, recusive networks, genetic algorithm, phono-saving technological process, optimization criteria, innovative activity.

REFERENCES

1. Selivanov S. G., Guzairov M. B., Kutin A. A. Innovatika: ucheb. dlya vuzov. M.: Mashinostroenie, 2008. 721 p.
2. Selivanov S.G. Veroyatnostno-rekurrentnyy metod optimizatsii perspektiv¬nykh tekhnologicheskikh protsessov v ASTPP aviadvi-gatelestroitel'nogo proizvodstva/ S. G. Selivanov, L. R. Chernya-khovskaya, O. A. Borodkina // Vestnik UGATU. – 2012.T.16 – No. 2 (48) – pp. 81-90.

3. Rekurrentnye neyronnye seti i metody optimizatsii proektnykh tekhnologicheskikh protsessov v ASTPP mashinostroitel'nogo pro-izvodstva / S. N. Poezzhalova [i dr.] // Vestnik UGATU. – 2011. Vol..15 – No. 5 (45) – pp. 36-46.
4. Selivanov, S. G. Logiko-geneticheskiy metod optimizatsii ASTPP aviadvigatelestroeniya v usloviyakh upravleniya proektami «berezh-livogo» proizvodstva/ S. G. Selivanov, V. V. Nikitin // Vestnik UGATU. – 2012. Vol.16 – No. 2 (48) – pp.63-69.