

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

С. Г. Селиванов¹, О. А. Гаврилова²

¹s.g.selivanov@mail.ru, ²Oks9036@yandex.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 13 октября 2014 г.

Аннотация. Использование методов искусственного интеллекта в технологических задачах позволяет осуществлять многокритериальную оптимизацию перспективных и проектных технологических процессов, а также дает возможность выбора и трансферта наилучших инновационных, высоких и критических технологий. Использование названных методов не только сокращает трудоемкость работ в рамках проблемно-ориентированной АСТПП по технологической подготовке производства новой конкурентоспособной продукции, но также позволяет находить оптимальные решения при разработке комплектов проектной технологической документации, необходимой для реконструкции и технического перевооружения действующего производства.

Ключевые слова: нейросетевые методы; вероятностно-рекуррентный метод; многокритериальная оптимизация; информационная модель; вероятностные распределения; перспективные технологические процессы; риски.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение конкурентоспособности машиностроительного производства требует от предприятий особого внимания не только к постановке на производство новых конкурентоспособных изделий, совершенствованию АСТПП (автоматизированных систем технической подготовки производства), но и к разработке инновационных проектов, системотехнической основой которых являются инновационные технологии инжиниринга, трансферта высоких и критических технологий и их внедрения в производство [1].

Основными направлениями разработки технологических инноваций в АСТПП является не только технологическое обеспечение конкурентоспособности продукции на стадиях НИОКР, но и проектирование материало-, фондо-, трудо-, энерго- и др. ресурсосберегающих технологий на этапах технологической подготовки производства новых изделий [1, 4].

Применение методов искусственного интеллекта для многокритериальной оптимизации новых технологий¹ на стадиях инновационного

проектирования в целях модернизации машиностроительного производства, позволяет снизить технологическую себестоимость, повысить производительность труда, решить другие важные задачи ресурсосбережения, что является значимой предпосылкой к выпуску конкурентоспособной продукции.

Из сказанного следует, что задача многокритериальной оптимизации инновационных технологий, на основе применения средств искусственного интеллекта для технологического (технического) перевооружения производства является актуальной.

1. ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В АСТПП

Для обоснования информационных технологий инновационного проектирования и автоматизированной разработки инновационных технологий на основе стандартов IDEF0 разработана функциональная модель специализированной АСТПП и блок-схемы ее функций для проектирования инновационных технологий, трансферта высоких технологий, оптимизации проектных технологических процессов и их внедрения в производство в инновационных

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда.

¹В том числе разработки высоких и критических; креативных и ключевых технологий; проектных,

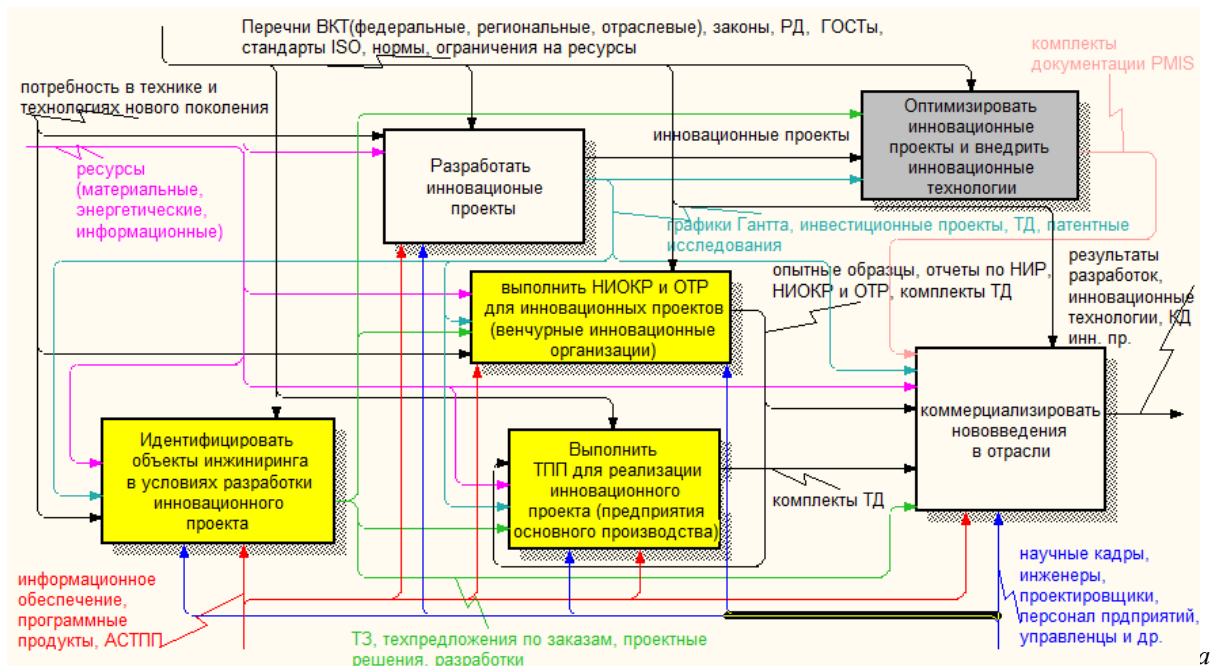
перспективных и директивных технологических процессов.

проектах технического (технологического) перевооружения машиностроительного производства (рис. 1).

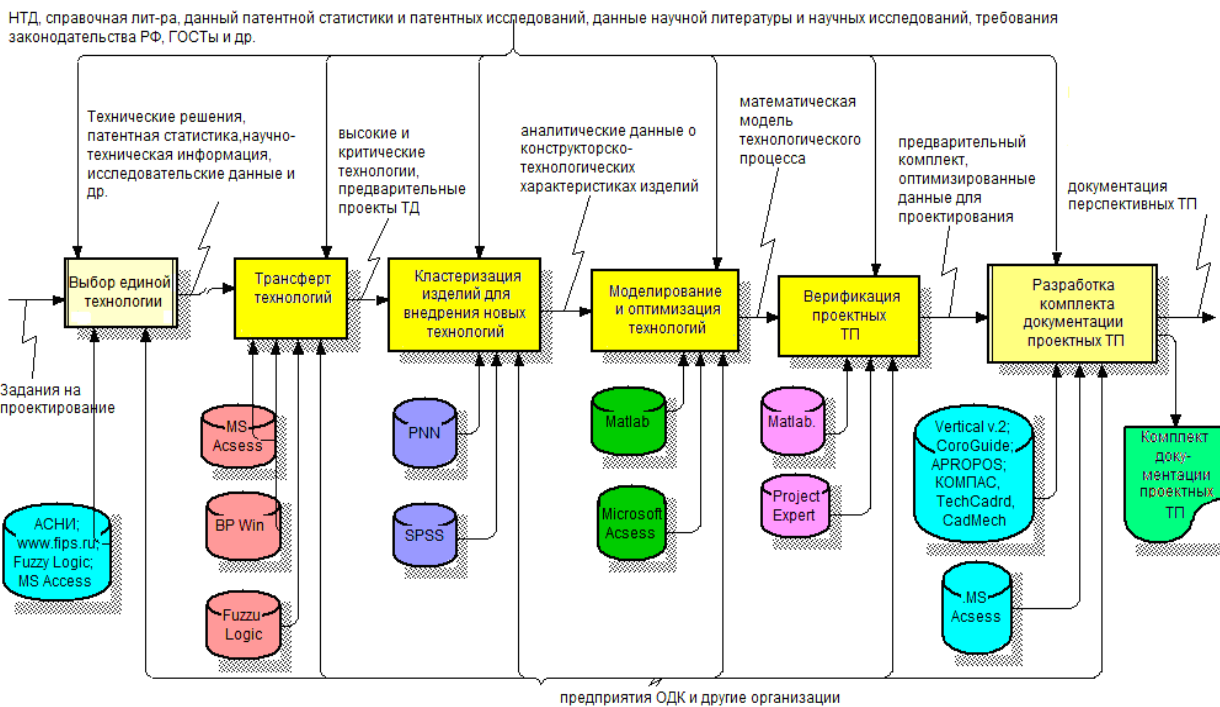
Разработанные функциональные модели отличаются от известных тем, что обеспечивают системную увязку различных процессов обоснования инновационных технологий от разработки единых технологий до оптимизации комплектов документации проектных технологиче-

ских процессов для условий инновационного проектирования технического перевооружения производства.

Для оптимизации инновационных технологий в рамках приведенных функциональных моделей потребовалась разработка нового вероятностно-рекуррентного метода искусственного интеллекта для определения Парето-оптимальных проектных решений (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Блок-схема функций (а) и задач оптимизации управления инновационными проектами (б) в рамках АСТПП, ориентированной на разработку инновационных технологий

2. РАЗРАБОТКА ВЕРОЯТНОСТНО-РЕКУРРЕНТНОГО МЕТОДА ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Аналитический обзор существующих методов математического моделирования и оптимизации в АСТПП технологических процессов: методов теории статистических решений, динамического программирования, генетических алгоритмов и искусственных нейронных сетей, позволил осуществить анализ положительных и отрицательных сторон каждого из методов, указать на возможности развития таких методов в направлении разработки инновационных технологий.

Анализ возможностей применения методов искусственного интеллекта для решения названных выше задач в АСТПП показал, что существующие в данный момент методы оптимизации не являются достаточными, а лишь решают специальные задачи. Так, например, методы генетических алгоритмов и логико-генетический метод нашли локальное применение для оптимизации только фондосберегающих технологических процессов, другим их недостатком является отсутствие возможностей применения для кластеризации, т.е. классификации и группирования деталей. Применение искусственных нейронных сетей Хопфилда и Элмана для многокритериальной оптимизации технологических процессов не учитывает применение закономерностей теории вероятностей и математической статистики в системном анализе новых технологий. Вследствие сказанного, потребовалась разработка нового вероятностно-рекуррентного метода для совершенствования АСТПП и оптимизации инновационных проектов технического (технологического) перевооружения производства [2].

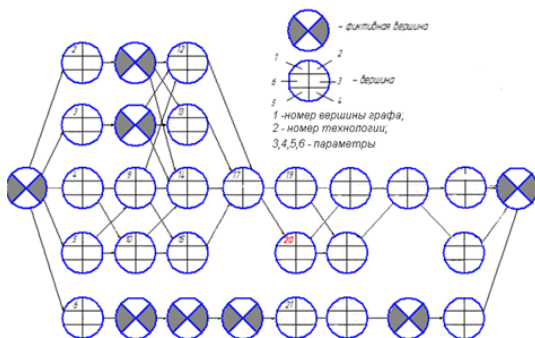


Рис. 2. Структурная многовариантная модель (граф) для выбора инновационной технологии на основе использования лучших отечественных и зарубежных разработок

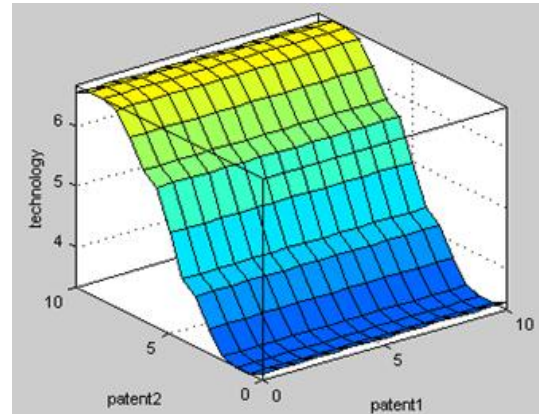


Рис. 3. Пример выбора высоких технологий на поверхности развития единых технологий с учетом трансферта лучших зарубежных технологий для разработки предварительных технологических проектов

Предложенный в публикации для оптимизации инновационных проектов технического (технологического) перевооружения производства новый метод системного анализа инновационных технологий, отличается применением гибридных вычислений в *Matlab*. Логика решения задач в данном методе определяется графом (рис. 2) с обоснованием параметров по каждой вершине графа:

а) экспертами на этапах трансферта технологий и разработки предварительных проектов технологической документации с помощью *Fuzzy Logic* (рис. 2, 3);

б) расчетами технически обоснованных параметров с помощью методов теории вероятностей и математической статистики для структурной оптимизации инновационных технологий с помощью рекуррентных нейронных сетей (рис. 2, 4–12) на этапах разработки проектных технологических процессов.

Разработка и исследование метода решения поставленной задачи с помощью вероятностно-рекуррентного метода оптимизации инновационных технологий начинается с кластерного анализа для группирования деталей в целях определения производственной программы реконструируемого цеха или проектируемого производственного участка [2, 3].

Выполнение таких работ с помощью искусственной нейронной сети *PNN* показало, что для сложных изделий, например, вертолетных газотурбинных двигателей (ВГТД), детали не всегда можно точно отнести к тому или иному классу, подклассу, виду, группе или типу. Их классификационные характеристики могут соответствовать нескольким классам (группам или типам одного класса) одновременно, что создает неоп-

ределенности в решении задач инновационного проектирования. Преодолеть данную проблему позволяет кластерный анализ, который дает возможность с помощью искусственной нейронной сети *PNN* в системе *Matlab* оценить новизну деталей, подлежащих постановке на производство, и более рационально распределить детали на группы по выбранным признакам в условиях существования неопределенностей [3].

В ходе анализа существующего производства, в данном случае деталей шестерен коробок приводов агрегатов газотурбинных двигателей (ГТД) и зубчатых колес вертолетных двигателей (ВГТД), было установлено, что решение задачи кластеризации позволяет рассчитать производственную программу путем:

- закрепления части типовых деталей шестерен ВГТД за существующими производственными участками изготовления аналогичных зубчатых колес ГТД путем использования типовых технологических процессов;
- обоснования номенклатуры нетиповых шестерен ВГТД для создания специализированного участка изготовления таких деталей только для вертолетной техники.

В результате нейросетевой кластеризации были получены множества (группировки) деталей с элементами зубчатого зацепления (шестерен), которые являются зубчатыми колесами (шестернями) исключительно вертолетной техники. На рис. 4 эти детали выпадают из прямоугольного раstra (сетки параллельных линий) кластеризации типовых деталей газотурбинных двигателей существующего производства зубчатых колес.

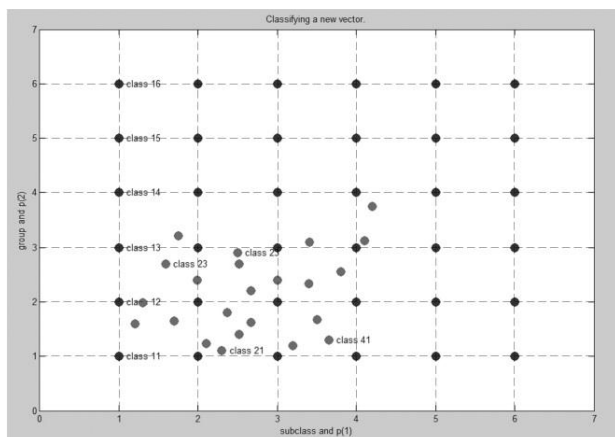


Рис. 4. Поле классификации деталей с помощью вероятностной нейронной сети PNN

Достоверность полученных результатов была обоснована с помощью алгоритма *K-сред-*

них (*K-means*), статистического иерархического кластерного анализа с помощью программного пакета *SPSS* и статистических данных (рис. 5, где представлены вероятностные распределения по характеристикам классифицируемых деталей ВГТД, которые можно использовать для обучения нейронной сети).

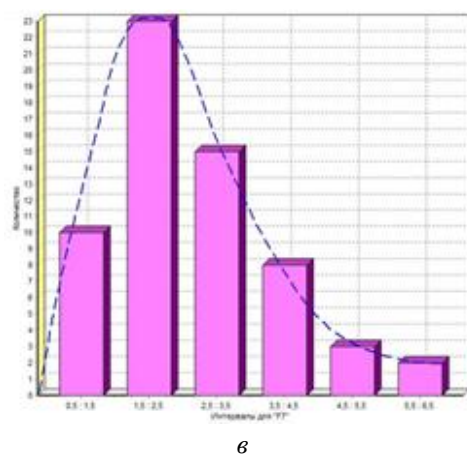
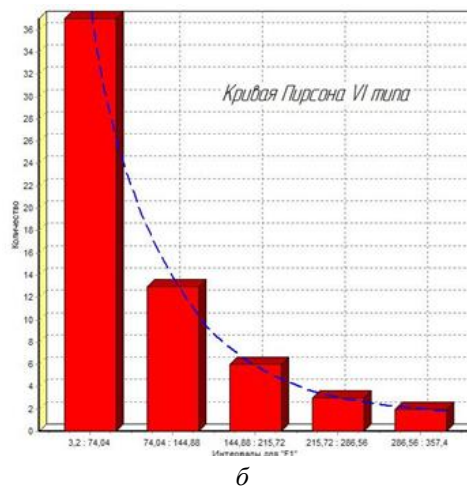
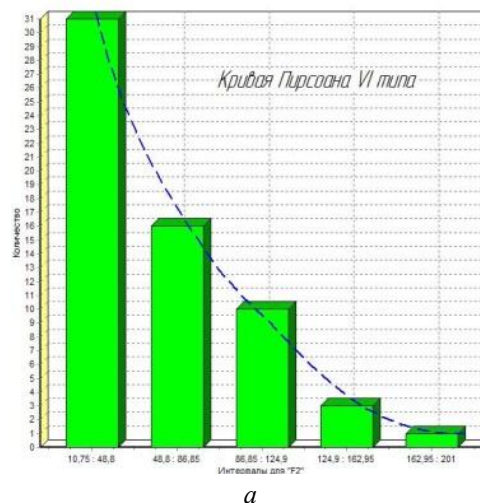


Рис. 5. Распределение по диаметральным размерам (а), по длинным размерам (б) и по модулям зубчатых венцов (в) шестерен ВГТД – кривая Пирсона VI типа

Появление в ходе системного анализа данных о нетиповом массиве зубчатых колес (шестерен) и является предпосылкой создания специализированного участка в цехе для изготовления деталей только вертолетной техники. Для названных нетиповых деталей должен быть выполнен полный объем работ по технологической подготовке производства и разработаны проектные технологические процессы, которые в данной публикации рекомендуется оптимизировать с помощью предложенного вероятностно-рекуррентного метода.

На основании разработанной с помощью кластерного анализа ведомости производственной программы вероятностно-рекуррентный метод обоснования инновационных технологий может быть применен для многокритериальной оптимизации проектных технологических процессов [4].

Основой метода в данном случае также как и для трансферта технологий являются гибридные модели, созданные путем комплексного применения теории графов в сочетании с методами искусственного интеллекта. Они объединены в общую вычислительную систему для анализа и синтеза инновационных технологий в виде маршрутных карт проектных технологических процессов с использованием рекуррентной нейронной сети Джордана в *Matlab*.

Отличительной чертой такой нейронной сети является то, что ее структура позволяет запоминать последовательности выполняемых действий над объектами, накопить информацию для выбора необходимого Парето-оптимального варианта решения поставленной задачи многокритериальной оптимизации проектного технологического процесса согласно выбранным критериям оптимизации, которые имеют локальные экстремумы (рис. 6–8).

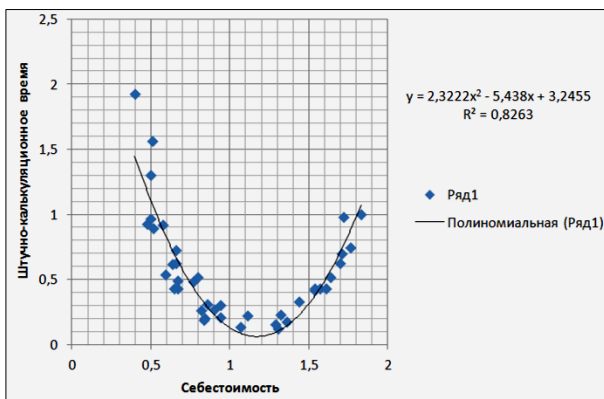


Рис. 6. Зависимость «штучно-калькуляционное время – себестоимость»

Для структурной оптимизации проектного технологического процесса, кроме нейронной сети Джордана, разработанный метод использует сетевой граф, созданный на основе базовой технологии, в данном случае изготовления шестерен, и дополненный другими вершинами-операциями. Эти новые вершины графа предусматривают: изменение плана обработки; обновление парка оборудования; применение мехатронных технологий; внедрение новых средств технологического оснащения для скоростной и высокоскоростной обработки; применение новых методов и режимов обработки; внедрение новых патентов на прогрессивные устройства и способы, использование других высоких и критических технологий [2, 5].

После формирования сетевого графа можно перейти к многокритериальной оптимизации. Для решения данной задачи определена целевая функция, представленная ниже, где T_i , C_i , Φ_i , K_i – оптимизируемые параметры, а μ_i – весовые коэффициенты, обозначающие «важность» заданного критерия оптимизации.

$$f = \sum_{i \in I} f_i = \sum_i [\mu_1 \cdot T_i + \mu_2 \cdot C_i + \mu_3 \cdot \Phi_i + \mu_4 \cdot (1 - K_i)] \rightarrow \min.$$

В качестве параметров численной оценки проектного технологического процесса использованы: затраты (C), время изготовления детали (T), фондоемкость² (Φ) – это минимизируемые критерии, а также максимальный коэффициент использования материала (K) в проектном технологическом процессе изготовления изделия.

Важной особенностью вероятностно-рекуррентного метода является то, что он использует не экспертные или табличные данные типовых технологических процессов, а статистически обоснованные данные для оптимизации проектных технологических процессов. В этой связи для условий реального производства и применения нового метода оптимизации был проведен ряд экспериментов с измерением времени выполнения технологических операций (как одного из основных критериев оптимизации) при изготовлении деталей типа «шестерня» (рис.10).

Таким образом, с помощью совместного применения сетевого графа и нейронной сети Джордана можно определить Парето-оптимальный технологический процесс изготовления деталей в виде маршрутной карты проектного (перспективного) технологического процесса [2, 5].

²Капиталовложения в запасы оборудования, технологической оснастки и площади.

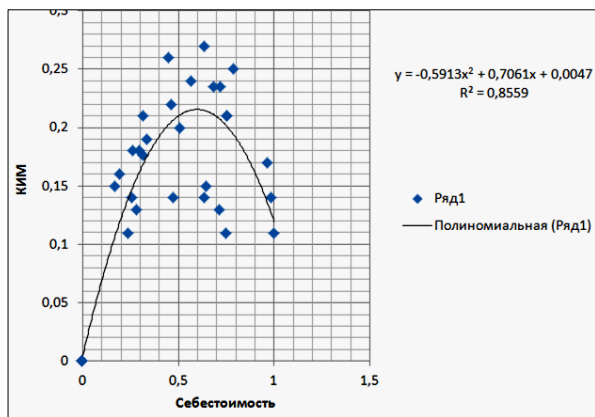


Рис. 7. Зависимость «КИМ–себестоимость» технологического процесса

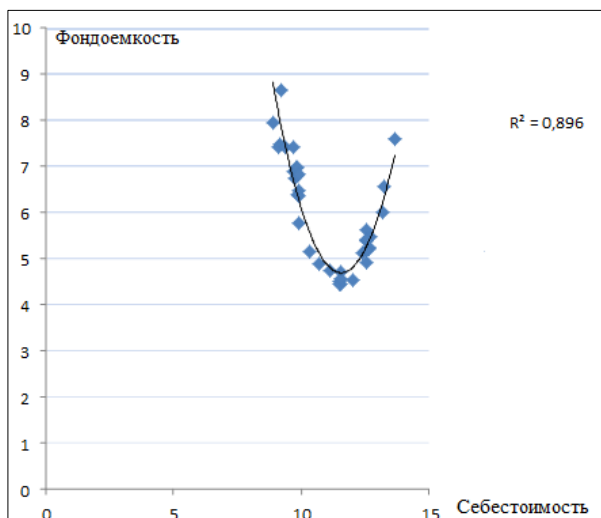


Рис. 8. Зависимость «себестоимость–фондоёмкость» технологического процесса

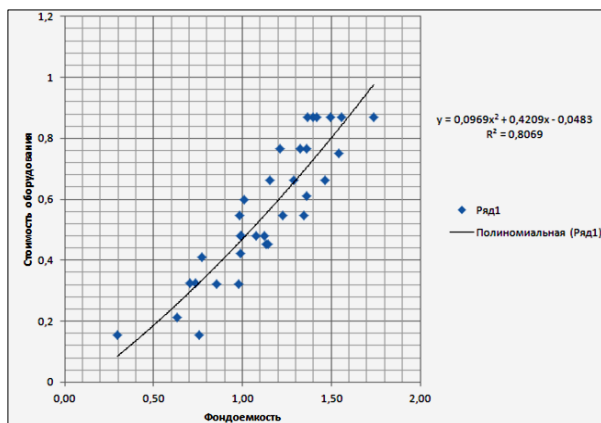


Рис. 9. Зависимость «стоимость оборудования –фондоёмкость» технологического процесса

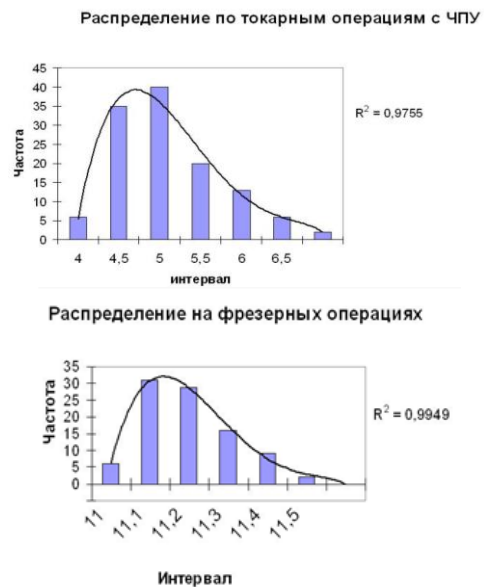


Рис. 10. Вероятностные распределения Пирсона по времени обработки детали типа «шестерня» на технологических операциях

3. МЕТОДЫ ВЕРИФИКАЦИИ ПРОЕКТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Для анализа достоверности результатов выбора оптимального варианта технологического процесса был проведен анализ результатов оптимизации проектных технологических процессов на основе моделирования инновационных технологий с использованием метода Монте-Карло и оценки научно-технических рисков. Для решения задачи верификации инновационных технологий с помощью метода Монте-Карло были проанализированы варианты новых технологических процессов, которые получены с помощью вероятностно-рекуррентного метода. Каждый из вариантов инновационных технологий, находящихся в области приближенной к Парето-оптимальному варианту, может быть использован в производстве, но технологические процессы, приближенные к экстремальному варианту, являются более предпочтительными для дальнейшей разработки комплекта документации проектного технологического процесса. Для окончательного ответа на вопрос о выборе проектного технологического процесса (инновационной технологии) необходимо учесть научно-технические риски инновационного проектирования.

В плане сказанного с помощью машинного эксперимента было получено распределение вариантов инновационных технологий (рис. 11), на основании которого можно делать вывод о целесообразности выбора того или иного варианта плана обработки (маршрута проектного

технологического процесса) детали – представителя группы (кластера деталей).

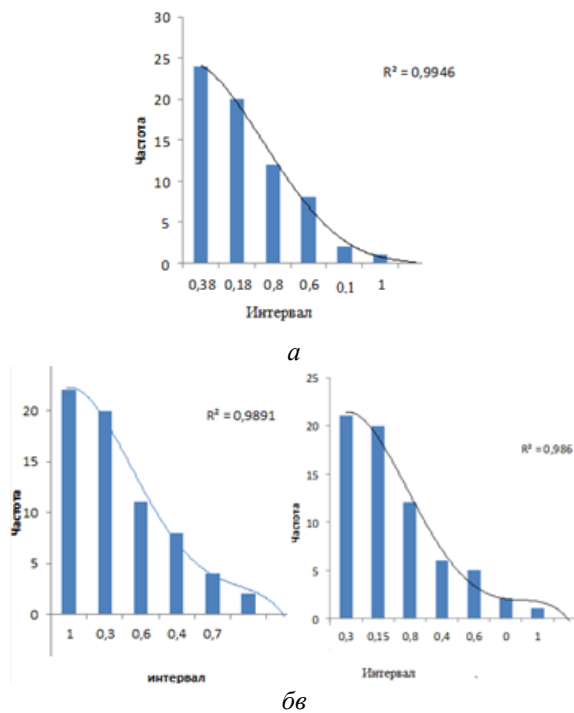


Рис. 11. Распределение вариантов инновационных технологий относительно оптимума по времени (а), себестоимости (б), фондоемкости (в)

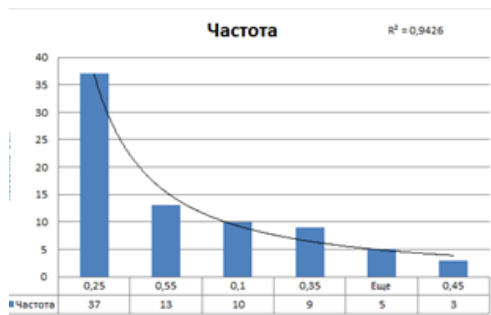


Рис. 12. Вероятностное распределение Пирсона (кривая VI типа) по рискам для верификации технологических процессов изготовления деталей типа «шестерня»

Полученные статистические зависимости позволяют оценить вероятность неудовлетворительных исходов и оценить Парето-оптимальный путь на графе (вариант инновационной технологии) для всего технологического процесса по критерию риска. При этом важно заметить, что оценки риска при верификации инновационной технологии позволяют также учесть статистику брака для выбора проектного технологического процесса. В частности, было установлено, что плотность распределения вероят-

ностей отрицательных результатов выполнения технологических операций (брак) при изготовлении детали подчиняется закону распределения Пирсона (рис. 12).

На основании результатов многокритериальной оптимизации и верификации инновационной технологии (проектного технологического процесса) изготовления деталей – представителей групп (кластеров) можно приступить к типовой процедуре оформления комплектов документации проектных и/или перспективных технологических процессов.

В этом плане по результатам применения вероятностно-рекуррентного метода для внедрения инновационной технологии была выполнена разработка комплекта проектной технологической документации изготовления деталей типа «шестерня» и разработаны информационные модели стандартных процедур по разработке комплектов технологической документации. Они были дополнены новыми электронными базами данных для трансферта технологий, выбора прогрессивного технологического оборудования и других средств технологического оснащения.

Для оценки достоверности и эффективности всего инновационного проекта технического (технологического) перевооружения производства шестерен ВГТД выполнено имитационное моделирование.

Для внедрения технологических инноваций в производство были разработаны: комплект документации инновационного проекта по созданию участка шестерен ВГТД, календарный план-график проекта в системе *MS Project* по созданию названного участка изготовления шестерен ВГТД, бизнес-план проекта, который подтвердил экономическую эффективность разработанного проекта внедрения технологических инноваций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная функциональная модель АСТПП, ориентированная на разработку инновационных технологий, позволяет использовать современные методы системотехнического проектирования для оптимизации проектов реконструкции и технического перевооружения машиностроительного производства, в том числе инновационных технологий: инжиниринга, трансферта высоких технологий и их внедрения в производство.

Разработанный в данном исследовании метод трансферта технологий позволяет на этапе разработки предварительных проектов технологической документации выбирать наиболее ра-

циональные патенты, что дает возможность определить в единой технологии лучшие отечественные и зарубежные устройства, способы, материалы, промышленные образцы и полезные модели для дальнейшей многокритериальной оптимизации инновационных технологий.

Разработанный с помощью вероятностной нейронной сети *PNN* метод кластеризации деталей авиационных двигателей для анализа их новизны позволяет осуществить выбор объектов инновационного проектирования в проектах технического (технологического) перевооружения производства и создавать новые специализированные производства.

Разработанный вероятностно-рекуррентный метод математического моделирования и многокритериальной оптимизации проектных технологических процессов позволяет определить Парето-оптимальные инновационные технологии, а также обеспечить разработку проектных технологических процессов, которые минимизируют затраты, время изготовления деталей, фондоемкость, расход материалов, обеспечивая тем самым ресурсосбережение и повышение качества инновационных проектов технического (технологического) перевооружения авиационного производства.

Имитационное моделирование и автоматизация разработки комплектов проектной документации инновационных проектов технического (технологического) перевооружения для проектирования новых производственных участков авиационного производства подтвердила экономическую эффективность разработанных методов математического моделирования и оптимизации инновационных технологий в АСТПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Селиванов С. Г., Гузаиров М. Б., Кутин А. А. Инноватика: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 2008. 721 с. [[S. G. Selivanov, M. B. Guzaïrov, A. A. Cutin, *Innovation*. Text-book for high schools. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie, 2008. Available: <http://innovatics-tm.ru/Учебник.pdf>]]
2. Бородкина О. А., Селиванов С. Г. Нейроструктурный метод многокритериальной оптимизации технологий. Разработка и оптимизация перспективных технологических процессов в авиационном двигателестроении и машиностроении. Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 160 с. [[О. А. Borodkina, S. G. Selivanov, *Neyrostruktury method mnogokriterial optimization technologies. Development and optimization of advanced technological processes in aircraft engine and mechanical engineering*. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2013. Available: <http://innovatics-tm.ru/wp-content/uploads/2014/05/Tekhnologicheskie-innovacii.pdf>]]
3. Бородкина О. А., Селиванов С. Г., Кузнецова К. С., Габитова Г. Ф., Поезжалова С. Н. Нейронные сети в АСТПП машиностроительного производства // Информационные

технологии и вычислительные системы. 2012. Т. 4, С. 59-71. [[О. А. Borodkina, S. G. Selivanov, K. S. Kuznetsova, G. F. Gabitova, S. N. Poeszhalova, "Neural networks in CAM engineering production," (in Russian), in *Informatsionnie tehnologii vichislitelnie sistemi*, RAN, vol. 4, pp. 59-71, 2012. Available: http://www.isa.ru/jitcs/index.php?option=com_content&view=article&id=398]]

4. Бородкина О. А., Селиванов С. Г., Паншина О. Ю., Поезжалова С. Н. Разработка инновационной системы подготовки производства в машиностроении // Инновации. 2013. №3(173). С. 78-84. [[О. А. Borodkina, S. G. Selivanov, O. Y. Panshina, S. N. Poeszhalova, "Developing innovative training system in production engineering," (in Russian), in *Innovation*, no. 3 (173), pp. 78-84, 2013. Available: www.mag.innov.ru]]

5. Бородкина О. А., Селиванов С. Г. Probabilistic-recurrent method optimization of the production processes in aircraft engine // CSIT2013: Proc. 15th Int. Workshop on Computer Science and Information Technologies (Vienna-Budapest-Bratislava, 15-21 Sept., 2013). Уфа: УГАТУ, 2013. Т. 2. С. 111-114. [[О. А. Borodkina, S. G. Selivanov, "Probabilistic-recurrent method optimization of the production processes in aircraft engine," in *Proc. 15th Int. Workshop on Computer Science and Information Technologies (CSIT2013)*, Vienna-Budapest-Bratislava, 2013, vol.2, pp. 111-114. Available: <http://csit.ugatu.ac.ru/2013/index.php>]]

ОБ АВТОРАХ

СЕЛИВАНОВ Сергей Григорьевич, проф. каф. технологии машиностроения. Дипл. инж. по автоматизации и компл. механизации машиностроения (УАИ, 1970). Д-р техн. наук по технол. машиностроения (Мосстанкин, 1991). Иссл. в обл. технол. подготовки и организации пр-ва.

ГАВРИЛОВА (Бородкина) Оксана Александровна, асп. каф. технологии машиностроения. М-р техн. и технол. в обл. технол., оборуд. и автоматиз. машиностроительного производства (УГАТУ, 2012).

METADATA

Title: Neural network method of optimization of innovative technologies

Authors: S.G. Selivanov¹, O.A. Gavrilo².

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹s.g.selivanov@mail.ru, ²Oks9036@yandex.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU, vol. 19, no. 1 (67), pp. 107-114, 2015.

Abstract: The use of artificial intelligence methods in technological tasks allows multiobjective optimization perspective and design processes. These methods make it possible to select and transfer the best of innovative, high and critical technologies. Using these methods, not only reduces the complexity of work within the problem-oriented automated system for pre-production, but also allows us to find optimal solutions for the time-processing complete sets of technical documentation, which is necessary for the reconstruction and technical re-equipment of production.

Key words: neural network methods; probabilistic and recursive method; multi-objective optimization; information model; probability distributions; advanced manufacturing processes; risks.

About authors:

SELIVANOV, Sergey Grigorievich, Dr. of Technical Sciences, Professor, the honored worker of science of BR.

GAVRILOVA (Borodkina), Oksana A., Post grad. (PhD) of mechanical engineering, Dipl. Master Engineer.