

С. Г. Селиванов, В. В. Никитин, В. С. Теплов, А. А. Тормышев

ЛОГИКО-ГЕНЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПТИМИЗАЦИИ АСТПП АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ В УСЛОВИЯХ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ «БЕРЕЖЛИВОГО» ПРОИЗВОДСТВА

Рассмотрены задачи внедрения бережливого производства в авиадвигателестроении. Предложен и разработан универсальный логико-генетический метод для оптимизации технологических маршрутов, технологических процессов, технологических комплексов и планировок оборудования цехов. АСТПП; генетические алгоритмы; оптимизация; бережливое производство

В настоящее время большинство компаний, являющихся мировыми индустриальными лидерами, переосмысливают и пересматривают производственные и организационные структуры для организации выпуска конкурентоспособной продукции в кратчайшие сроки и с минимальными затратами. В этом плане многие предприятия признали конкурентоспособной моделью реорганизации производства производственную систему на основе принципов «бережливого» производства (Lean Production), которая основана на философии кайдзен (в японской транслитерации) [1, 2].

Принципы и инструменты «бережливого» производства для совершенствования производственных систем уже используют и реализуют многие ведущие предприятия: Toyota, Ford, Boeing, Airbus, Rolls-Royce, United Technologies, в т.ч. Pratt & Whitney, SAFRAN Group, GE, Scania, Alcoa, Херох..., а в нашей стране: Камаз, Уралмаш, ОЗНА, Русал и другие. В авиадвигателестроении (ОАО «УМПО», ОАО «ПМЗ», ОАО «НПО «САТУРН») для совершенствования и реорганизации производства в целях выпуска конкурентоспособной продукции также приступили к освоению и использованию принципов и инструментов «бережливого» производства.

Таким образом, вопрос реструктуризации и технической подготовки реконструкции авиадвигателестроительных предприятий на основе внедрения методов «бережливого» производства для создания современного конкурентоспособного авиадвигателестроительного производства предельно актуален. Тем не менее, существующие достижения технических наук пока еще не обеспечили полного решения проблем

технической подготовки производства в этой области управления проектами.

Целью данного исследования является тематическое и информационное обеспечение создания автоматизированной системы для оптимизации проектов технической реконструкции и управления проектами технической подготовки производства, которые обеспечивают реализацию принципов организации «бережливого» производства, многокритериальную оптимизацию решения проектно-технологических задач.

Методологическую основу для решения поставленных задач определяет математическое моделирование и оптимизация на основе применения логико-генетического метода из числа средств искусственного интеллекта, в частности, использование генетических алгоритмов для многокритериальной оптимизации проектных решений.

Научная новизна решения поставленных задач на основе разработки унифицированного логико-генетического метода заключается в управлении материальными потоками авиадвигателестроительного производства.

Практическая значимость работы подтверждена актами о внедрении результатов работы на ОАО «УМПО» и заключается в организации реконструкции авиадвигателестроительного производства на основе принципов «бережливого» производства. Практическое применение новых методов АСТПП-БП приводит к снижению затрат на изготовление продукции за счет экономного использования производственных площадей, капиталовложений, парка оборудования, численности производственных рабочих, сокращения грузооборота, рациональной разработки на этой основе проектных технологических процессов и повышения, в конечном счете, конкурентоспособности предприятия.

1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАЗРАБОТКИ АСТПП «БЕРЕЖЛИВОГО» ПРОИЗВОДСТВА

Проведенный анализ источников научной информации показал, что в данный момент для развития и обеспечения конкурентоспособности машиностроительного производства используются разобщенные методы организационно-технологического проектирования производства, которые рассматривают только отдельные задачи и не увязаны в единые высокоавтоматизированные комплексы технической подготовки «бережливого» производства на основе управления проектами реконструкции. При проведении работ по автоматизации процессов технической подготовки решается ряд задач организационно-технологической подготовки производства, которые могут быть автоматизированы на основе использования средств искусственного интеллекта, а именно, проектирование технологических процессов, формирование технологических маршрутов обработки деталей, разработка компоновок корпусов и технологических планировок оборудования.

Анализ методов искусственного интеллекта для решения описанных выше задач АСТПП показал, что существующие в данный момент разобщенные методы оптимизации могут быть унифицированы на базе разработки единого логико-генетического метода, ориентированного на создание «бережливого» производства.

Установлено, что известные аналоги применения логико-генетического метода в физике, радиотехнике, теории распознавания образов использованы как метод визуального отображения структурных взаимосвязей, и только в задачах распознавания образов предложено использовать генетические алгоритмы в составе инструментов логико-генетического метода.

С помощью матрицы инцидентности (табл. 1 и 2) установлено, что основным отличием предложенного пути развития логико-генетического метода является использование материальных потоков *M* для дальнейшего математического моделирования и оптимизации с помощью логико-генетического метода проектных решений по созданию цехов «бережливого» производства, что говорит о возможности дальнейшего совершенствования логико-генетического метода.

Сказанное позволяет в дальнейшем для оптимизации проектно-технологических решений в АСТПП-БП использовать не просто генетические алгоритмы, а логико-генетический метод многокритериальной оптимизации, в котором генетические алгоритмы являются средством

для анализа и синтеза оптимальных проектных решений на графах, характеризующих производственные структуры, структуры технологических процессов и структуры работ по организации «бережливого» производства.

Таблица 1

Матрица инцидентности применения логико-генетического метода в физике (I), радиозлектронике (II) и теории распознавания образов (III)

I				II				III			
<i>S</i>	<i>F</i>	<i>R</i>		<i>S</i>	<i>F</i>	<i>R</i>		<i>S</i>	<i>F</i>	<i>R</i>	
0	0	0	<i>M</i>	0	0	0	<i>M</i>	0	0	0	<i>M</i>
1	1	0	<i>Э</i>	0	1	0	<i>Э</i>	0	0	0	<i>Э</i>
0	0	0	<i>И</i>	1	1	0	<i>И</i>	0	1	0	<i>И</i>

Таблица 2

Матрица инцидентности применения логико-генетического метода в АСТПП-БП

<i>S</i>	<i>F</i>	<i>R</i>	
1	1	1	<i>M</i>
0	0	0	<i>Э</i>
1	1	1	<i>И</i>

M – материальный; *Э* – энергетический; *И* – информационный потоки; *S* – структура; *F* – функции; *R* – развитие системы).

На основании сказанного для анализа возможностей разработки различных приложений логико-генетического метода в АСТПП для обоснования «бережливого» производства была использована методология SADT и система функционального моделирования (IDEFO), на основании которых разработана специализированная функциональная модель АСТПП-БП (рис. 1).

На основании данной функциональной модели АСТПП-БП исследованы следующие функции АСТПП «бережливого» производства:

- «Разработка комплекта проектной технологической документации ресурсосберегающих технологических процессов»;
- «Разработка технологической части проектов»;
- «Организация и управление ТПП».

Для каждой из названных выше функций АСТПП-БП проработаны соответствующие им блок-схемы задач, документооборот и определен единый логико-генетический метод для дальнейшего математического моделирования и оптимизации проектных разработок в целях создания цехов «бережливого» производства.

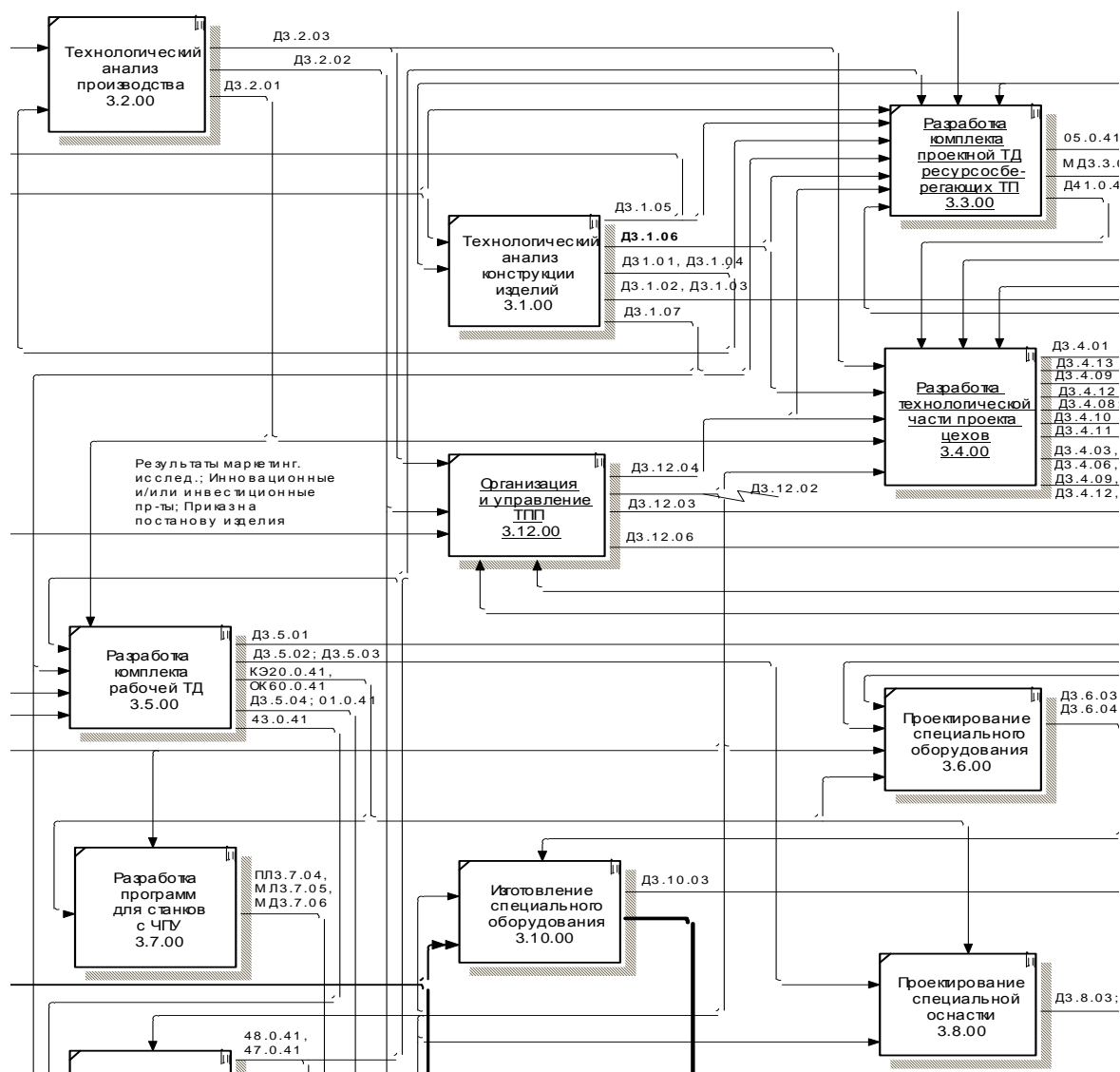


Рис. 1. Функциональная модель АСТПП «бережливого» производства (фрагмент)

Для оптимизации технологических маршрутов в логико-генетическом методе применен сетевой граф, на котором указаны основной маршрут и множество альтернативных вариантов. Вершины графа в данном случае – это номера цехов (или специализированных производственных участков), а ребра показывают взаимосвязь вершин между собой и расстояние между цехами или производственными участками.

После формирования сетевого графа технологических маршрутов можно перейти ко второму этапу использования логико-генетического метода оптимизации технологических маршрутов с помощью генетических алгоритмов. При оптимизации технологических маршрутов требуется найти такой маршрут производства изделия, для которого суммарный грузооборот

$$G_i = \sum l_i \cdot m_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где i – индекс, соответствующий номеру цеха; l – расстояние; m – масса деталей.

Здесь в логико-генетическом методе использован классический генетический алгоритм. В этом алгоритме фенотип хромосомы представляет собой набор значений номеров цехов, иными словами – маршрут производственного процесса движения изделий по цехам предприятия. Например, для 4 цехов хромосома – $ch1 = (1\ 4\ 3\ 2)$.

Оценивание приспособленности хромосомы в популяции состоит в расчете функции приспособленности, т. е. в расчете суммарного грузооборота.

Отличительной чертой данного способа применения логико-генетического метода является то, что в алгоритме используется один ге-

нетический оператор – оператор скрещивания, суть которого заключается в случайном выборе точки скрещивания, в которой обе хромосомы делятся на две части и обмениваются ими. Формирование новой популяции производится за счет объединения «родителей» и «потомков».

Условие остановки работы алгоритма имеет два варианта. Первый вариант остановки алгоритма – достижение ожидаемого оптимального значения, т. е. определенная в данном случае хромосома является наиболее приспособленной из всей популяции. Второй вариант – выполнение заданного количества итерации. Если условие остановки выполнено, то происходит переход к завершающему этапу выбора «наилучшей хромосомы». На основании сказанного выше для решения поставленной задачи разработана программа «ТПП БП», выполненная в MS Visual Studio 2008.

Разработанный метод позволил оптимизировать технологический маршрут производства модуля ВВТ (воздухо-воздушного теплообменника) в ОАО «УМПО», что позволило создать предметно-замкнутое производство и оценить эффективность практического его применения.

Метод многокритериальной оптимизации фондосберегающих технологических процессов. По результатам оптимизации технологических маршрутов по критерию минимума грузооборота можно приступить к решению задач по оптимизации технологических процессов в цехах на таком эффективном маршруте. При этом приоритетными критериями оптимизации разработки маршрутных карт проектных технологических процессов выступают показатели ресурсосбережения в цехах.

Для оптимизации маршрутных карт проектных технологических процессов и разработки фондосберегающих технологий из числа экономически эффективных проектных технологических процессов предложено использовать логико-генетический метод. Новизна предложенного метода оптимизации проектных технологических процессов заключается в применении многокритериальной оптимизации многовариантного сетевого технологического графа с помощью генетического алгоритма по критериям минимумов капиталовложений, площадей и штучно-калькуляционного времени. Другими словами, осуществляется минимизация входных переменных производственной системы (финансовых ресурсов, используемых основных производственных фондов и трудовых ресурсов), что обеспечивает фондосбережение в проектах.

Для каждой i -ой технологической операции величина аддитивного критерия (целевая функция) определяется по формуле:

$$f_i = \mu_1 \cdot K + \mu_2 \cdot \Pi + \mu_3 \cdot t \rightarrow \min, \quad (2)$$

где K , Π , t – названные выше нормализованные приведенные значения: капиталовложений в оборудование (K), площади (Π) и штучно-калькуляционного времени (t) на i -ой технологической операции, выполняемой на r -ой модели технологического оборудования. Капиталовложения K определены по величинам балансовой стоимости оборудования, площади Π – по нормативам удельной площади на единицу оборудования, t – штучно-калькуляционное время рассчитывается для каждой операции известными методами определения расчетно-аналитических норм времени на операциях технологических процессов.

На первом этапе работы логико-генетического метода технологический процесс можно представить в виде сетевого графа, где вершины графа – технологические операции обработки, а дуги определяют возможность их последовательного выполнения. Каждой вершине графа присваивают параметры соответствующей ей операции технологического процесса.

Работа генетического алгоритма логико-генетического метода аналогична описанной выше процедуре, только в данном случае использовано другое представление исходных данных, хромосома представляет собой набор значений номеров операций (вершин), иными словами, содержит описание технологического процесса. Задача оптимизации проектных технологических процессов также как и в предыдущем случае реализована в программе «ТПП БП».

В качестве начальной популяции создается возможный путь на графе, который представлен в виде матрицы смежности, в каждой ячейке которой записывается число, определяющее наличие связи от вершины-строки к вершине-столбцу (либо наоборот), где i – число вершин, а j – число слоев технологического графа.

В качестве генетического оператора используется оператор скрещивания, аналогичный используемому оператору в решении задачи оптимизации технологических маршрутов.

Условие остановки работы алгоритма – достижение ожидаемого оптимального значения, т. е. найденная таким путем хромосома является наиболее приспособленной из всей популяции.

Разработка логико-генетического метода оптимизации технологических компоновок производственных корпусов предприятия. Задача компоновки корпуса состоит в следующем. Исходная информация задается набором данных $\langle W_k, L_k, n, s \rangle$, где W_k – ширина производственного корпуса; L_k – длина производственного корпуса; n – количество цехов в корпусе; $s = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ – площадь цехов (прямоугольников), $i = (1 \dots n)$, где i – индекс, соответствующий номеру цеха.

При этом n цехов в корпусе является частью производственной структуры предприятия, связанных схемой грузопотоков. Иными словами, данная структура является сетевым графом, где вершины – это цехи, а ребра их взаимосвязи – грузопотоки.

Решение задачи представляется в виде набора элементов $\langle W, L \rangle$, где $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$, $L = (l_1, l_2, \dots, l_n)$ – векторы ширины и длины прямоугольников (площадей цехов); w – ширина цеха; l – длина цеха.

При выполнении условий допустимости требуется найти такую компоновку корпуса или цеха, для которой суммарный грузооборот

$$G_i = \sum (l_i / 2) m_i \rightarrow \min. \quad (3)$$

Для решения задачи компоновки предложено использовать логико-генетический метод. Метод позволяет проектировать компоновочные схемы производственных корпусов по критерию минимизации грузооборота, который является обязательным требованием проектирования производственных структур в условиях «бережливого» производства.

Новизна предложенного метода технологической компоновки производственных корпусов заключается в оптимизации структурной модели предприятия путем объединения в корпусе нескольких цехов с помощью генетического алгоритма по критерию минимума грузооборота.

Здесь фенотип хромосомы представляет собой набор значений ширины цехов w_i . Например, для 4 цехов хромосома $ch = (8 \ 4 \ 8 \ 17)$.

Оценивание приспособленности хромосомы в популяции состоит в расчете функции приспособленности, т. е. в расчете суммарного грузооборота.

Для апробации и оценки эффективности логико-генетического метода была разработана технологическая компоновка одного из корпусов ОАО «УМПО».

Разработка логико-генетического метода многокритериальной оптимизации технологи-

ческих планировок оборудования цехов. Задача оптимального размещения технологического оборудования на производственных участках состоит в следующем. Исходная информация задается набором данных $\langle W, L, n, N, m, mar, l, w \rangle$, где W – ширина производственного участка; L – длина производственного участка; n – количество моделей станков; N – приведенная программа выпуска каждой группы деталей; m – масса обрабатываемых деталей $m = (m_1, m_2, m_3, \dots, m_n)$, $i = (1, \dots, n)$; mar – маршруты обработки деталей; l – длина станка; w – ширина станка.

Набор элементов $\langle l, w \rangle$ называется допустимой планировкой, если выполнены следующие условия:

- прямоугольники не перекрывают друг друга;
- прямоугольники не выходят за границы участка.

При выполнении условий допустимости требуется найти такую планировку оборудования, для которой значения суммарного грузопотока (G) и занимаемой площади (S) стремились к минимуму. Целевая функция рассчитывается как свертка этих критериев.

$$F = \alpha_1 \cdot G^* + \alpha_2 \cdot S^* \rightarrow \min, \quad (4)$$

где G^* , S^* – значения соответственно грузопотока и площади, приведенные к относительному безразмерному виду по формуле:

Ограничениями являются размеры участка: W – ширина участка; L – длина участка.

В данном исследовании предложено использовать логико-генетический метод для двухкритериальной оптимизации как по критерию минимума грузооборота, так и по величине производственной площади.

Новизна предложенного метода оптимизации технологических планировок оборудования состоит в использовании многокритериальной оптимизации графа производственной структуры участков цеха с помощью генетического алгоритма по критерию минимума грузооборота и площади.

Решение задачи представляется в виде хромосомы, генами которой являются номера станков, поэтому перед началом работы каждой единице оборудования присваивается номер.

В ходе компьютерного моделирования и решения задачи многокритериальной оптимизации производственных участков установлена зависимость грузопотока (G) от занимаемой площади (S) (рис. 2). Из рисунка видно, что при минимальной величине грузопотока величина

площади не достигает своего минимума. Такая ситуация является классической при использовании методов многокритериальной оптимизации. Отсюда полученная зависимость требует определять Парето-оптимальные планировочные решения в рамках логико-генетического метода.

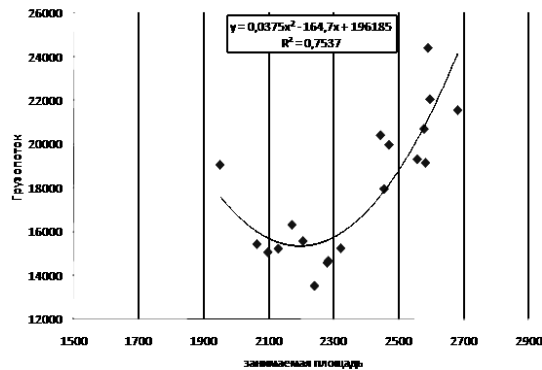


Рис. 2. Зависимость грузопотока (G) от площади (S) (y – соответствует G , а x – величине S)

Оптимизация графиков технологической подготовки «бережливого» производства. Задача оптимизации план-графиков реконструкции цехов для создания «бережливого» производства заключается в следующем. Имеются этапы проекта (работы) и длительность работ. Требуется построить расписание этих работ минимальной длины, обеспечивающее наименьшее время окончания выполнения этапов (работ), с учетом того, что все работы должны быть выполнены. Иными словами, необходимо построить «минимальный путь» выполнения работ определенного проекта, т. е. $\sum T_i \rightarrow \min$, $i = 1, \dots, n$, где n – количество работ, а i – индекс номера работы (этапа).

Для решения этой задачи использован логико-генетический метод оптимизации план-графиков технической подготовки производства. Новизна предложенного метода оптимизации план-графиков выполнения проектов технической подготовки производства заключается в:

- автоматизации расчета календарных план-графиков с помощью генетического алгоритма;
- использовании установленных в диссертационном исследовании ряда регрессионных зависимостей изменения трудоемкости работ по технической подготовке производства (рис. 3).

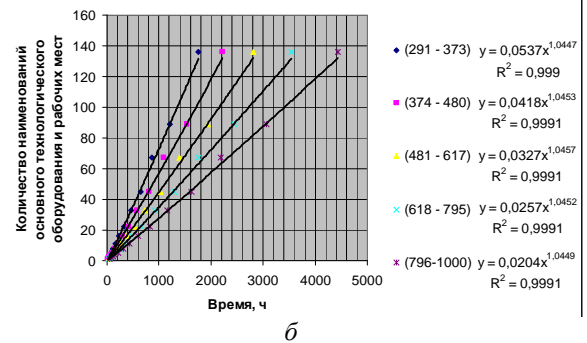
Решение задачи представляется в виде хромосомы, генами которой являются этапы (работы) проекта технической подготовки производ-

ства, поэтому перед началом работы каждому этапу присваивается номер.

Таким образом, данный метод позволяет выполнить оптимизацию календарных план-графиков проекта по критерию минимума времени выполнения работ.



Нормы времени на работы по расчету производственной мощности и загрузки оборудования



Нормы времени на работы по реализации мероприятий по повышению эффективности производства

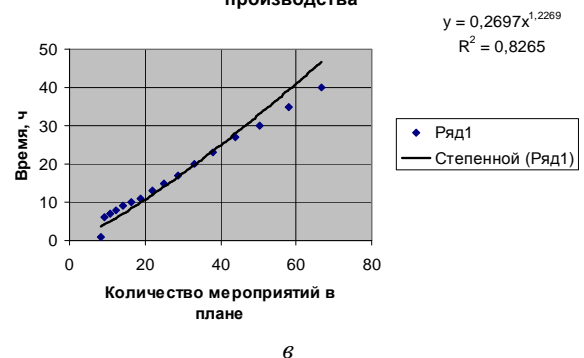


Рис. 3. Зависимости изменения трудоемкости работ по технической подготовке производства (примеры)

Автоматизация расчета сроков реконструкции и технического перевооружения цехов машиностроительного производства. В проектах по созданию цехов «бережливого» производства рекомендуется использование системы непрерывной реконструкции и технического

переворужения производства. В настоящее время авторами публикации разработана программа автоматизации расчетов для обоснования календарных план-графиков реконструкционных работ на основе анализа графиков загрузки производственных мощностей и расчета регрессионных зависимостей изменения объемов выпуска изделий, что позволило обоснованно определять сроки проведения реконструкции и технического перевооружения цехов машиностроительных предприятий для профилактики возникновения дисбалансов загрузки производственных мощностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Логико-генетический метод оптимизации проектно-технологических решений обеспечивает в АСТПП-БП на авиадвигателестроительных предприятиях проектирование и управление проектами создания цехов «бережливого» производства.

Основные научные и практические результаты, полученные в ходе разработки логико-генетического метода для АСТПП, состоят в следующем:

- построена функциональная модель автоматизированной системы управления технической подготовкой производства (АСТПП-БП) и разработаны информационные технологии для проектирования «бережливого производства» на авиадвигателестроительных предприятиях;

- разработаны средства математического и информационного обеспечения автоматизированной системы технической подготовки производства для оптимизации проектов реконструкции и управления технической подготовкой производства с помощью логико-генетического метода, которые обеспечивают рациональное проектирование и управление проектами на принципах организации «бережливого производства»;

- выполнено математическое моделирование проектов организационно-технологических комплексов авиадвигателестроительного предприятия и решены функциональные задачи управления проектами реконструкции на основе оптимизации проектно-технологических решений для создания цехов и участков «бережливого» производства.

Разработанные в составе функциональных модулей АСТПП-БП на основе логико-генетического метода информационные технологии:

- оптимизации проектных технологических процессов,
- выполнения технологических компоновок и планировок оборудования,
- расчета сроков реконструкции цехов и участков обеспечили на авиадвигателестроительном производстве ОАО «УМПО» многокритериальную оптимизацию проектов создания «бережливого» производства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Вейдер М.** Инструменты бережливого производства: Мини-руководство по внедрению методик бережливого производства. М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. 125 с.
2. **Вумек Дж. П., Джонс Д. Т.** Бережливое производство: Как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. М.: Альпина Бизнес Букс, 2005. 473 с.
3. Технологическая подготовка бережливого производства в машиностроении / В. В. Никитин [и др.] // Технология машиностроения. 2010. № 4 (94). С. 67–71.
4. Использование методов искусственного интеллекта в технологической подготовке машиностроительного производства / В. В. Никитин [и др.] // Вестник УГАТУ. 2010. Т. 14, № 1(36). С. 87–97.

ОБ АВТОРАХ

Селиванов Сергей Григорьевич, проф. каф. технологии машиностроения. Дипл. инженер по автоматизации и комплексн. механизации машиностроения (УАИ, 1970). Д-р техн. наук по технологии машиностроения (Мосстанкин, 1991). Иссл. в обл. технол. подг., реконстр., организ. пр-ва.

Никитин Виталий Викторович, асп. той же каф., менеджер Уфимск. моторостроительн. производств. объединения (ОАО УМПО). Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. технол. подг., реконстр., организ. пр-ва.

Теплов Валерий Сергеевич, асп. Башкирск. акад. гос. службы и управления при Президенте РБ.) нач. управления Уфимск. моторостроительн. производств. объединения (ОАО УМПО). Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2002). Иссл. в обл. технол. подг., реконстр., организ. пр-ва.

Тормышев Алексей Александрович, асп. каф. технологии машиностроения, менеджер Уфимск. моторостроительн. производств. объединения (ОАО УМПО). Дипл. бакалавр экономики (УГАТУ, 2009), экономист-менеджер (УГАТУ 2010). Иссл. в обл. технол. подг., реконстр., организ. пр-ва.