

УДК 004.8:621

С. Г. СЕЛИВАНОВ, В. В. НИКИТИН, М. А. ДРУЖИНИНА, В. Г. ШИПИЛОВА

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА В МАШИНОСТРОЕНИИ

В статье рассмотрены проблемы создания АСТПП (автоматизированной системы технологической подготовки бережливого производства). Приведена функциональная модель АСТПП. Рассматриваются задачи проектирования фондосберегающих технологических процессов, компоновки и планировки оборудования. Для автоматизации решения названных задач предложены методы математического моделирования и оптимизации проектно-технологических решений на основе использования средств искусственного интеллекта в виде искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов. *АСТПП; бережливое производство; ресурсосбережение; генетические алгоритмы; нейронные сети*

В современном мире большинство компаний, являющихся мировыми индустриальными лидерами в своих отраслях, признали конкурентоспособной моделью инновационной реорганизации производства организационную систему на основе принципов Лин (бережливого производства), основанной на стратегии Кайдзен (яп. «непрерывное улучшение») и подходе Канбан (когда между подразделениями, цехами и производственными площадками происходит оперативное взаимодействие). Эти системы, стратегии и подходы уже реализуют многие ведущие предприятия: Toyota, Ford, Boeing, Airbus, GE, Scania, Alcoa, Херох, ..., а в нашей стране: Камаз, Уралмаш и другие. В мировом авто- и авиапроме, машиностроении, металлургии, судостроении, приборостроении сегодня практически повсеместно основой корпоративной философии лидеров все чаще становятся принципы Lean Production [1, 2, 3].

### 1. СОЗДАНИЕ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Термин Lean Production («бережливое производство») был введен для обобщения японских производственных методик, позволяющих сократить затраты труда, времени и пространства наряду с повышением эффективности и минимизации дефектов производства с помощью управления цепочками поставок, использования японских принципов канбан, кайдзен, пока-эке, целью которых является устранение действий, не приносящих дополнительных ценностей для предприятий. Американские менеджеры, копи-

рующие названную систему японских производственных методик для США и Европы, в дополнение к сказанному акцент делают на том, что Lean Production – это прорывный подход к менеджменту и управлению качеством, обеспечивающий долговременную конкурентоспособность без существенных капиталовложений.

Инструменты бережливого производства позволяют рассмотреть всю цепочку продвижения товаров и услуг по лабиринту бизнес-процессов предприятия от склада до отгрузки, выделив в ней те этапы и состояния материального потока в которых организация (компания) несет потери. В настоящее время считается, что перейти к бережливому производству без предварительного внедрения ERP (упорядочения производственных процессов) фактически невозможно.

В условиях стран с формирующейся рыночной экономикой в дополнение к сказанному система бережливого производства призвана облегчить переход от централизованного жесткого управления бизнесом к бизнесу, основанному на вовлечении работников и превалировании горизонтальных подходов к управлению над вертикальными.

Анализ систем управления бережливым производством на авиадвигателестроительных предприятиях (General Electric Aviation, Rolls-Royce, United Technologies, в том числе Pratt & Whitney, SAFRAN Group, ОАО УМПО и др.) показывает, что система управления бережливым производством может быть структурирована по функциям управления предприятием (организации и управления производством, в том числе оперативным управлением производством; управления инновационной деятельностью, в том числе

НИОКР, технологической подготовкой производства, реструктуризацией и реконструкцией; управления качеством; управления персоналом; управления рефинансированием на основе финансового менеджмента и т. д.). В данной статье рассмотрены проблемы создания автоматизированной системы технологической подготовки бережливого производства.

## **2. СИСТЕМОТЕХНИКА ПОСТРОЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Автоматизация технологической подготовки «бережливого производства» основывается на использовании системы IDEF0, методологии SADT (Structured Analysis Design Technique), построении функциональных моделей АСТПП (автоматизированной системы технологической подготовки производства) и разработке функциональных и информационных моделей технологической подготовки бережливого производства» по каждой функции, задаче и процедуре управления (рис. 1).

Блок-схема функций представляет собой модель, состоящую из блоков и связей между ними. Каждую из функций системы технологической подготовки производства можно представить в виде комплекса решаемых задач. К каждой блок-схеме задач в рассматриваемом случае разработаны спецификации и ведомости технологического документооборота.

Для автоматизации решения названных задач могут быть использованы различные методы. В данной статье основным курсом действий было использование средств искусственного интеллекта для создания «интеллектуальной» АСТПП. Рассмотрим более подробно методы автоматизации решения задач с использованием средств искусственного интеллекта.

### **3. МЕТОДЫ АВТОМАТИЗАЦИИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В АСТПП БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА**

#### **3.1. Методы разработки технологических маршрутов**

В любой АСТПП принято разрабатывать два типа маршрутов:

- расцеховки, которые оформляют в виде ведомостей технологических маршрутов движения изделий по цехам и службам предприятий;
- маршрутные карты технологических процессов, которые определяют последовательность движения изделий в процессе обработки

или сборки по технологическим операциям (рабочим местам).

В первом случае траектория, которую описывает продукт (заготовка, деталь, сборочная единица) формирует поток создания ценности (в системах Lean Production такую траекторию называют диаграммой «спагетти» – spaghetti chart). На диаграммах данного типа изображают технологический маршрут, который проходит изделие на всех стадиях производства. Анализ диаграмм показывает, что любая деятельность может быть трансформирована в поток.

Решение рассматриваемой проблемы по упорядочиванию транспортно-технологических потоков (схем) в системах Lean Production относится к классу транспортных задач. Для оптимального решения классической транспортной задачи выделяют два типа критериев: критерий стоимости (достижение минимума затрат на перевозку) или расстояний и критерий времени (затрачивается минимум времени на перевозку), которые используют, например, в приложении к методам линейного программирования или генетических алгоритмов для поиска оптимального решения.

Оптимизация решения транспортных задач ведет к изменению производственной структуры предприятия, изменению форм специализации его цехов и производственных участков, изменению схем грузопотоков, величин грузооборотов и связанных с ними транспортно-технологических схем переработки тарноштучных грузов. Все эти преобразования транспортно-технологических схем имеют следствием изменение генерального плана предприятия, компоновочных схем его производственных корпусов, цехов и производственных участков и другие изменения в производственной и организационной структуре.

Более подробному решению задач об определении оптимальных маршрутов в системе бережливого производства служит оптимизация технологических маршрутов на уровне разработки маршрутных карт технологических процессов изготовления каждой детали изделия.

В данном случае предлагается использовать методы искусственного интеллекта. Для задачи многокритериальной оптимизации фондосберегающего технологического процесса – это частично-рекуррентная сеть Элмана. Для математического моделирования и оптимизации проектно-технологических решений по разработке оптимальных фондосберегающих технологических процессов на уровне разработки маршрутных карт применяется система математического моделирования MatLab 7.1.

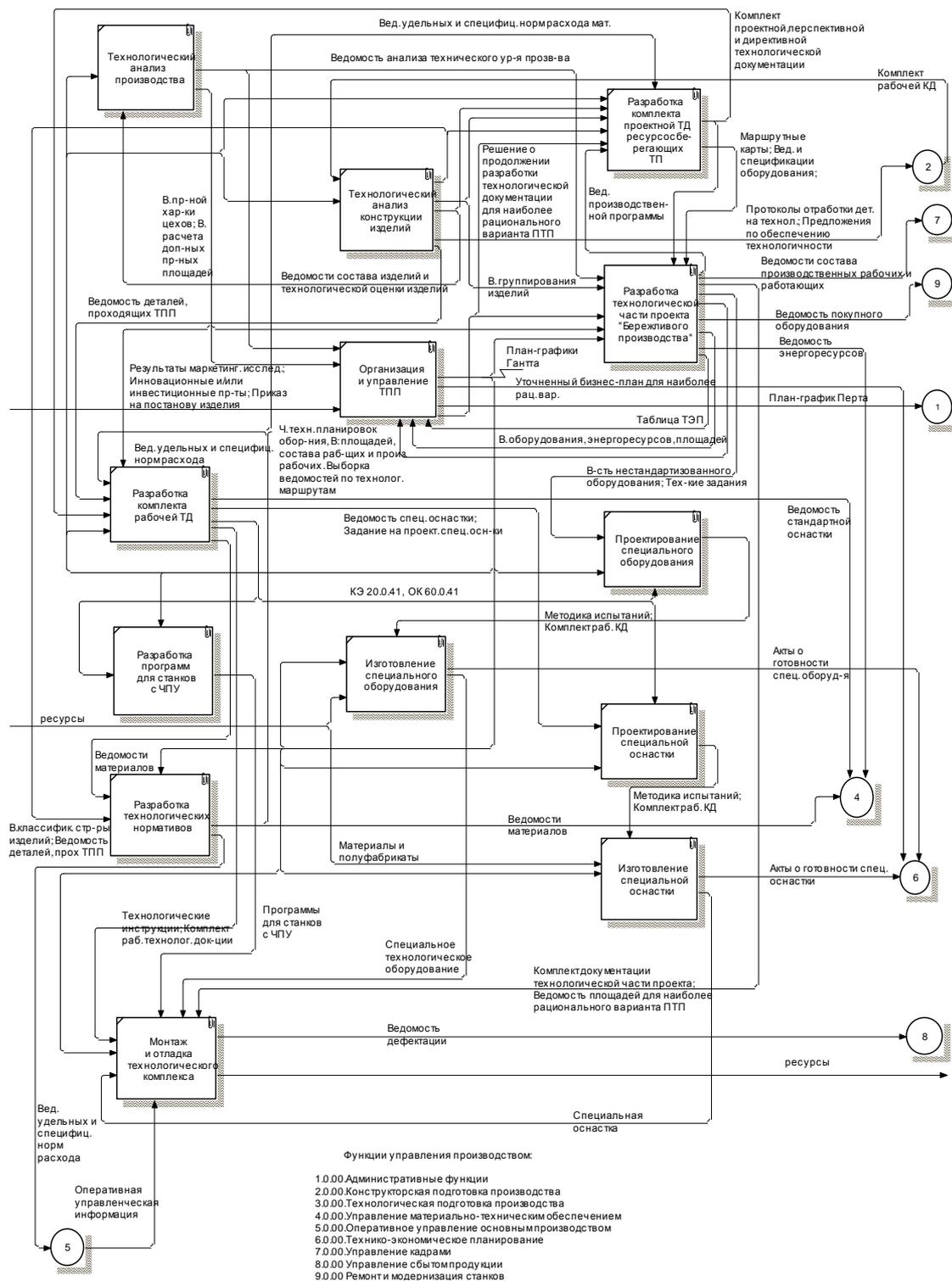


Рис. 1. Функциональная модель АСТПП бережливого производства

Для оптимизации могут применяться только рекуррентные сети из-за наличия у них обратных связей, которые необходимы для обеспечения циклического функционирования нейронной сети во времени. Нейронная сеть Элмана – один из видов рекуррентной сети, которая получается из многослойного персептрона введением обратных связей, только связи идут

не от выхода сети, как, к примеру, у искусственной нейронной сети Хопфилда [4], а от выходов внутренних нейронов. Это позволяет учесть предысторию наблюдаемых процессов и накопить информацию для выработки правильной стратегии управления изменением технологических процессов.

Предлагаемый метод отличается от метода, рассматриваемого в [4] в приложении к использованию искусственных нейронных сетей Хопфилда тем, что в данном случае оптимизация осуществляется в целях разработки фондосберегающих технологических процессов по четырем критериям: минимумов капиталовложений в оборудование и площадей под оборудование и максимумов коэффициентов сменности и загрузки оборудования.

Задачи главных специалистов (главного технолога, главного металлурга, главного сварщика) при внедрении системы бережливого производства в рамках функции «разработка комплекта проектных технологической документации ресурсосберегающих технологических процессов» (рис. 1) заключаются не только в оптимизации технологических процессов, но также предусматривают:

- разработку и внедрение ресурсосберегающих технологических процессов (трудосберегающих, материалосберегающих, фондосберегающих, энергосберегающих);
- разработку унифицированных технологических процессов (типовых, групповых, стандартных);
- обеспечение ресурсосбережения при разработке и внедрении перспективных и директивных технологических процессов;
- обеспечение внедрения быстропереналаживаемых средств технологического оснащения;
- разработку технологических процессов переработки отходов, в том числе изготовления из отходов изделий подсобного производства, возврата отработанной технической воды, регенерации СОЖ и т. д.;
- внедрение прогрессивных материальных норм и нормативов (расхода материалов, запасов оснастки, стойкости инструментов);
- внедрение технически обоснованных норм времени, в том числе экспериментально-аналитических, полученных по результатам фотографии рабочего дня и хронометража.

Опыт внедрения бережливого производства в авиа- и двигателестроении на Pratt & Whitney (США) показал, что к моменту завершения проекта по переходу на бережливое производство на предприятии не осталось ни одного процесса, который бы не прошел через кайдзен хотя бы один раз. Целью данных мероприятий было выпускать все детали в производственных ячейках (на рабочих местах, в производственных группах оборудования, на производственных участках или в линиях станков), работающих по принципу непрерыв-

ного производства, достигнув в каждой ячейке близкого к нулю уровня незавершенного производства.

### 3.2. Методы разработки технологических компоновок и планировок

Главными задачами реорганизации производственных подразделений предприятия, реализующего концепцию бережливого производства в данном случае, также как и в предыдущем, является фондосбережение, трудосбережение, материалосбережение и энергосбережение, но на основе решения следующих задач:

- оптимизации генерального плана предприятия;
- разработки рациональных транспортно-технологических схем;
- высвобождения из основного производства старых корпусов и рациональное использование неамортизированных зданий;
- реконструкция и техническое перевооружение цехов на основе реализации принципов Lean Production;
- внедрение основных форм организации Lean Production (поточного производства, групповых поточных линий, гибких производственных систем и роботизированного производства, участков интегрированного производства, участков группового производства с «цепным расположением оборудования»);
- высвобождение из производственного процесса физически изношенного и морально устаревшего оборудования;
- сокращения удельной площади под оборудование и т. д.

Опыт зарубежных авиадвигателестроительных предприятий (Pratt & Whitney, США) по внедрению бережливого производства показал, что за время выполнения проекта удалось переместить на другое место все семь тысяч станков, организовать производство двигателей в непрерывном потоке. Поток двигался через производственные модули и попадал на окончательную сборку при помощи простой «вытягивающей системы». В каждом модуле, где изготавливались компоненты двигателя, была произведена реорганизация восьмидесяти бизнес-единиц, каждая из которых отвечала за производство определенной группы деталей. Сказанное позволило Pratt & Whitney уменьшить производственные площади с 12,5 млн кв. футов до 8 млн кв. футов.

Для решения названных задач на рис.1 показана функция «Разработка технологической части проектов бережливого производства».

Для оптимального выполнения данной функции в «АСТПП бережливого производства» были выполнены следующие разработки на основе использования средств искусственного интеллекта:

1) проектирование технологических компоновок производственных корпусов и цехов предприятия, внедряющего систему бережливого производства;

2) проектирование технологических планировок оборудования оптимизируемых корпусов и цехов предприятия.

Технологическая компоновка – это чертеж с изображением на нем в плане производственных, вспомогательных, складских, энергетических и конторско-бытовых помещений цеха или корпуса без пространственного размещения оборудования. Для разработки технологической компоновки необходимы не только данные по производственной и организационной структуре объекта реконструкции, но и сведения из технологической части по результатам разработки проектных ресурсосберегающих технологических процессов.

Главные требования к технологической компоновке – это выполнение принципов точности, минимизации грузооборота, наилучшего использования площадей и объемов здания. Компоновочная схема корпуса необходима для разработки технологической планировки оборудования цехов, она является также основанием для проектирования или уточнения генерального плана предприятия и проектирования транспорта для внезаводских и межцеховых перевозок.

Планировка оборудования – это графическое изображение на плане и разрезах всего оборудования, автоматических линий, ступеней, подъемно-транспортных устройств и инженерных сетей, предназначенных для обслуживания технологических процессов.

Компоновка и планировка – сложнейшие этапы проектной работы, они представляют собой ту часть проекта, которая увязывает все звенья производственного механизма и превращает его в единую и слаженную систему технологических и инженерно-технических служб. Сложность выполнения этих работ заключается в необходимости глубокого анализа взаимосвязанных факторов, влияющих на планировку, и умении выбирать из них решающие, определяющие целесообразность того или иного варианта пространственного размещения оборудования. В планировочных разработках собираются воедино все вопросы, связанные с осуществлением технологических

процессов, организацией производства и экономикой, техникой безопасности, с проектированием средств транспорта и с внедрением механизации и автоматизации.

Для разработки оптимальной технологической компоновки корпуса наиболее близка задача упаковки в прямоугольные листы и задача типа «гильотинного раскроя» листов металла. Задача прямоугольной упаковки в прямоугольные листы состоит в следующем. Исходная информация задается набором данных  $\langle W, L, m, w, l \rangle$ , где  $W$  – ширина листа;  $L$  – длина листа;  $m$  – количество прямоугольников;  $w = (w_1, w_2, \dots, w_i, \dots, w_m)$  – вектор ширин прямоугольников;  $l = (l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_m)$  – вектор длин прямоугольников. Вводится прямоугольная система координат  $XOY$ , у которой оси  $OX$  и  $OY$  совпадают соответственно с нижней и боковой сторонами листа (в нашем случае с граничными линиями раstra корпуса или сетки его колонн).

Решение задачи представляется в виде набора элементов  $\langle X, Y \rangle$ , где  $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_m)$ ,  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_m)$  – векторы координат прямоугольников,  $(x_i, y_i)$  – координаты нижнего левого угла прямоугольника соответственно по оси  $X$  и  $Y$ . Набор элементов  $\langle X, Y \rangle$  называется допустимой прямоугольной упаковкой. Если количество требуемых для размещения листов  $N$  достигает минимума, то найденное размещение – оптимально.

Для решения задач раскроя-упаковки нами использованы средства искусственного интеллекта в виде генетических алгоритмов: генетический блочный алгоритм (Genetic Block Algorithm, GBA) и генетический гильотинный алгоритм (Genetic Guillotines Algorithm, GGA).

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 ширин и длин прямоугольников (площадей цехов);  $w$  – ширина цеха;  $l$  – длина цеха. Набор элементов  $\langle W, L \rangle$  называется допустимой компоновкой, если выполнены следующие условия:

1) прямоугольники не перекрывают друг друга;

2) прямоугольники не выходят за границы корпуса:

$$W_k = \sum w_i.$$

для всех  $i=1, \dots, n$   $l_i \leq L_k$ ;

3) ширина цеха не должна быть меньше 3 м, т. е.  $w_i \leq w_{\min}$ , где  $w_{\min}$  – минимальная ширина цеха,  $w_{\min} = 3$  м.

При выполнении условий допустимости требуется найти такую компоновку корпуса,

для которой суммарный грузооборот ( $\sum G_i$ ) достигает минимума.

$$\sum G_i = \frac{l_i}{2} \cdot m.$$

Поставленная задача относится к NP-полным задачам, при решении которых точными методами оптимизации время сходимости алгоритма экспоненциально увеличивается в зависимости от количества единиц размещаемых объектов, прямоугольников (площадей цеха).

Генетические алгоритмы – это процедуры поиска, основанные на механизмах естественного отбора и наследования. В них используется эволюционный принцип выживания наиболее приспособленных особей. Очень важным понятием в генетических алгоритмах считается функция приспособленности (fitness function), иначе называемая функцией оценки. Она представляет меру приспособленности данной особи в популяции. Эта функция играет важнейшую роль, поскольку позволяет оценить степень приспособленности конкретных особей в популяции и выбрать из них наиболее приспособленные (т. е. имеющие наибольшие значения функции приспособленности) в соответствии с эволюционным принципом выживания «сильнейших» (лучше всего приспособившихся). Она оказывает сильное влияние на функционирование генетических алгоритмов и должна иметь точное и корректное определение. Очередная популяция в генетическом алгоритме называется поколением, а к вновь создаваемой популяции особей применяется термин «новое поколение» или «поколение потомков».

Для решения описанной выше задачи компоновки с использованием названных выше правил построения генетических алгоритмов, был разработан метод технологической компоновки корпусов машиностроительных предприятий с использованием эволюционных генетических алгоритмов. Метод позволил выполнить (разработать) компоновочные схемы производственного корпуса площадью 120,0 тыс. кв. м.

Научная новизна метода заключается в использовании известных из теории искусственного интеллекта математических методов построения генетических алгоритмов по новому назначению – для выполнения технологической компоновки производственного корпуса машиностроительного предприятия по критерию минимума грузооборота.

При решении поставленной задачи фенотип хромосомы представляет собой набор зна-

чений ширин цехов  $w_i$ . Например, хромосома  $ch = (8\ 4\ 8\ 17)$ , для 4 цехов. А генотип хромосомы, двоичное кодирование значений задачи, т. е. ширину цеха  $w_i$ . Например,  $ch = (001000\ 000100\ 001000\ 010001)$ , где 1 или 0 являются генами данной хромосомы.

На этапе инициализации, формирования исходной популяции, хромосомы проверяют на выполнение условий задачи компоновки, которые были описаны выше, тем самым формируются «правильные» хромосомы, удовлетворяющие условиям задачи. Оценивание приспособленности хромосомы в популяции состоит в расчете функции приспособленности, т. е. в расчете суммарного грузооборота. Селекция хромосом производилась методом рулетки. Суть данного метода заключается в следующем: каждой хромосоме сопоставляется сектор колеса рулетки, величина которого устанавливается пропорционально значению функции приспособленности данной хромосомы. Поэтому чем больше значение функции приспособленности, тем больше сектор на колесе рулетки и вероятность выбора данной хромосомы в качестве родителя. В данном алгоритме используется один генетический оператор – оператор скрещивания (кроссовер), так как мутация практически не влияет на результат. Используется односточный 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.

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».

Кроме оптимизации технологических компоновок цехов в производственном корпусе в АСТПП бережливого производства предложен также новый метод решения задачи оптимизации планировок оборудования, отличающийся от известных методов [4, 5], где использовалась оптимизация по критерию минимума грузопотока, тем, что в данном случае предлагается двухкритериальная оптимизация: по критериям грузопотока и площади.

При оптимизации по критерию грузопотока надо стремиться к уменьшению межоперационных перемещений деталей, по критерию

минимизации площадей – к наиболее компактному расположению станков с целью высвобождения как можно большей площади и использовать ее в других целях. Далее, по двум критериям выбирается оптимальный вариант планировки оборудования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реализация концепции бережливого производства с учетом рассмотренной выше АСТПП бережливого производства и методов оптимизации проектно-технологических решений позволяет получить результаты, близкие к данным зарубежных предприятий-аналогов. Так, на предприятии Pratt & Whitney (США) внедрение системы бережливого производства позволило получить следующие результаты:

- запасы сырья, незавершенного производства и готовой, но не отгруженной продукции уменьшились на 70% и продолжали уменьшаться; центральный склад, на котором хранились детали, ожидающие обработки на следующей стадии, был закрыт;
- создание вытягивающей системы на стадии окончательной сборки инициировало цепную реакцию ликвидации системы MRP по всей компании;
- процент выхода годных изделий на заводе в Норт Хэвене повысился с 10 почти до 100%;
- себестоимость изготовления деталей уменьшилась на 20%;
- убытки в 283 млн долларов, которые в 1992 г. были у компании – устранены, а с 1994 г. в Pratt & Whitney прибыль равнялась 380 млн. долларов, в 1995 г. – 530 млн долларов; рентабельность продаж возросла с 3,3% в 1993 г. до 22,9% в 2001 г., а рентабельность активов с 3% до 17,9% в тот же период;
- доходы Pratt & Whitney повысились с 5545 млн \$ в 1994 до 7645 млн \$ в 2002 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вумек Д. П., Джонс Д. Т. Бережливое производство: как избавиться от потерь и добиться процветания вашей компании. М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. 473 с.
2. Вэйдер М. Инструменты бережливого производства. Мини-руководство по внедрению методик бережливого производства. М.: Альпина Бизнес Букс, 2007. 125 с.
3. Масааки И. К. Ключ к успеху японских компаний. М.: Альпина Бизнес Букс, 2006. 274 с.
4. Селиванов С. Г., Иванова М. В. Теоретические основы реконструкции машиностроительного производства. Уфа: Гилем, 2001. 310 с.

5. Лобуз В. В. Формирование технологически ориентированных структур оборудования в пространстве цеха с использованием генетических алгоритмов // Справочник. Инженерный журнал. 2007. № 9. С. 40–46.

### ОБ АВТОРАХ



**Селиванов Сергей Григорьевич**, проф. каф. технол. машиностр. Дипл. инж. по автоматиз. и компл. механиз. машиностр. (УАИ, 1970). Д-р техн. наук по технол. машиностр. (Мосстанкин, 1991). Иссл. в обл. технол. подг., реконстр., организ. пр-ва.



**Никитин Виталий Викторович**, аспирант УГАТУ. Дипл. магистр техники и технологии. Менеджер Уфимск. моторостроительн. производств. объединения (ОАО УМПО).



**Дружинина Марина Александровна**, соискатель. Дипл. специалист в обл. машиностр. (УГАТУ, 2008)



**Шипилова Влада Георгиевна**, соискатель. Дипл. специалист в обл. машиностр. (УГАТУ, 2008).