

На правах рукописи

**САВВА ТАТЬЯНА ЮРЬЕВНА**

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ РАСПИСАНИЙ  
НА ПРЕДПРИЯТИЯХ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ ПЛОДООВОЩНОГО СЫРЬЯ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими  
процессами и производствами (промышленность)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орел – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс»

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
доктор экономических наук, профессор  
Савина Ольга Александровна

Официальные оппоненты: Аверченков Андрей Владимирович,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Брянский государственный технический университет», профессор кафедры «Компьютерные технологии и системы»

Лобанова Валентина Андреевна,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК», профессор кафедры «Электроника, вычислительная техника и информационная безопасность»

Ведущая организация: Научно-исследовательский и проектный институт  
«Градоагроэкопром»

Защита состоится 10 декабря 2013 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.182.01 при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК».

Автореферат разослан 08 ноября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.182.01  
кандидат технических наук, доцент

Волков Вадим Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Управление производственными процессами на предприятиях осуществляется на основе план-графиков производства различного уровня. Имеющийся опыт разработки и внедрения подсистем оперативного планирования и диспетчирования АСУП, реализующих процедуры формирования производственных расписаний, показал их эффективность в отраслях машиностроения, строительства, легкой промышленности. Однако, как показывает практика, эти разработки малопригодны для использования на предприятиях по переработке скоропортящегося сырья, в т.ч. плодоовощного.

В основе настоящего исследования лежат результаты работ в области теории систем (В.М. Глушков, Д.А. Поспелов, А.А. Модин, И.С. Константинов, А.Г. Мамиконов), теории графов (В.Е. Котов, Дж. Питерсон, Н. Кристофидес, Р. Хаггарти, А.А. Лескин), имитационного моделирования (В.Д. Кельтон, Р. Шеннон, О.А. Савина, А.А. Емельянов) объектно-ориентированного моделирования и программирования (Г. Буч, Дж. Рамбо, А. Джекобсон, М. Фаулер), теории реляционных баз данных (Дж. Ульман, Т. Тиори, Р.Дж. Мюллер).

В организации производственных процессов на предприятиях пищевой промышленности можно выделить ряд особенностей, которые, прежде всего, обусловлены спецификой используемого скоропортящегося сырья, которое способно изменять в определенных условиях свое качественное состояние вплоть до непригодного к дальнейшему использованию.

Согласно «Стратегии развития пищевой и перерабатывающей промышленности Российской Федерации на период до 2020 года» проблемы обеспечения населения страны качественным продовольствием, повышения конкурентоспособности продукции отечественного производства, а также ресурсосбережения и эффективного использования производственных мощностей являются актуальными и высоко значимыми для российской промышленности. В условиях необходимости обеспечения продовольственной безопасности России в стране наметился рост числа предприятий по производству и переработке плодоовощной продукции, а, следовательно, актуальной становится проблема формирования производственных расписаний с учетом особенностей, присущих этим предприятиям, что позволит обеспечить эффективность их функционирования за счет более рационального использования сырья и снижения его потерь. Ввиду того, что формирование производственных расписаний представляет собой сложную вычислительную задачу, для ее решения на предприятиях целесообразно применение специальных программных средств, которые могут быть интегрированы в подсистему оперативно-календарного планирования АСУП. Обзор представленного на рынке программного обеспечения автоматизированных систем показал, что их функционал по формированию производственных расписаний не позволяет в достаточной мере учесть особенности переработки плодоовощного сырья. В связи с этим на многих предприятиях по переработке плодоовощного сырья формирование производственных расписаний осуществляется в ручном режиме, что требует не только высокой квалификации и значительного опыта у лица, принимающего решения, но и занимает длительное время по сравнению со временем технологических операций, а также допустимыми сроками нетехнологического пролеживания используемого на таких предприятиях сырья. Таким образом, разработка модели технологических маршрутов переработки плодоовощного сырья, которая может быть положена в основу программного средства, позволит облегчить процедуру формирования производственных расписаний, сократить дефицитное время на ее осуществление, эффективнее использовать скоропортящееся сырье, производственные мощности и, как

следствие, сократить потери сырья и максимизировать выпуск готовой продукции надлежащего качества.

**Объектом исследования** в данной работе являются процессы формирования производственных расписаний в подсистеме оперативно-календарного планирования на предприятиях по переработке плодоовощного сырья. В качестве **предмета исследования** рассматриваются модели и алгоритмы формирования и реализации производственных расписаний при оперативно-календарном планировании на предприятиях по переработке плодоовощного сырья.

**Целью диссертационного исследования** является сокращение потерь исходного сырья за счет повышения качества и оперативности принятия управленческих решений.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Анализ специфики задачи формирования производственных расписаний, методов ее решения и инструментальных средств автоматизации на предприятиях по переработке плодоовощного сырья.

2. Моделирование процесса формирования производственных расписаний предприятий по переработке плодоовощного сырья.

3. Разработка и исследование алгоритмов формирования производственных расписаний.

4. Разработка и исследование информационных и программных средств формирования производственных расписаний.

5. Программная реализация прототипа средств автоматизации формирования производственных расписаний, их тестирование и внедрение в подсистему оперативно-календарного планирования предприятий по переработке плодоовощного сырья.

**Методы и средства исследований.** В диссертационном исследовании использованы методы теории систем, теории графов, имитационного и объектно-ориентированного моделирования, теории реляционных баз данных. При проектировании программного средства автоматизированного формирования производственных расписаний использовался стандарт UML.

**Достоверность** научных положений подтверждается корректностью применения математического аппарата, адекватностью математических моделей, а также результатами практического использования созданного прототипа программного средства автоматизированного формирования производственных расписаний.

**Научная новизна диссертационного исследования:**

1. Математическая модель технологических маршрутов, реализуемых на предприятиях по переработке плодоовощного сырья, в основе реализации которой лежит разработанный автором в рамках данного диссертационного исследования модифицированный аппарат сетей Петри, учитывающий особенности процесса переработки плодоовощного сырья и отличающийся правилами установления разрешимости срабатывания вершин-переходов.

2. Методика формирования производственных расписаний для предприятий по переработке плодоовощного сырья, основанная на дискретно-событийном подходе и отличающаяся использованием разработанной модифицированной сети Петри для учета структуры и особенностей реализации технологических маршрутов.

3. Алгоритм построения модифицированной сети Петри при формировании производственных расписаний.

4. Алгоритм формирования производственных расписаний на основе построенной модифицированной сети Петри, отличающийся возможностью оценки весов маркеров при определении разрешимости срабатывания вершин-переходов.

### **Практическая ценность диссертационного исследования:**

1. Программная реализация прототипа средств автоматизированного формирования производственных расписаний для предприятий по переработке плодоовощного сырья, включающая в себя реализацию разработанных алгоритмов.

2. Результаты применения прототипа средств автоматизированного формирования производственных расписаний в подсистеме оперативно-календарного планирования на предприятиях по переработке плодоовощного сырья при разработке и корректировке производственных расписаний в ходе исполнения производственных программ.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы внедрены в деятельность предприятия ООО «Пищевик» (г. Болхов) в виде программного средства формирования производственных расписаний в подсистеме оперативно-календарного планирования; а также используются в учебном процессе на кафедре «Информационные системы» ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» при преподавании дисциплин «Корпоративные информационные системы», «Автоматизированные системы управления предприятием».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции «Инновационные информационные технологии» (2012 г., 2013 г., Прага), международной научно-практической конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» (2012 г., Орел), международной молодежной конференции «Прикладная математика, управление и информатика» (2012 г., Белгород), российской научно-практической конференции с международным участием «Специалист 21 века: экономическое образование в обеспечении устойчивого развития человеческого потенциала» (2012 г., Пермь), а также на международной конференции, посвященной интеллектуальным информационным системам, «International Conference on Intelligent Information Systems» (IS2013) (2013 г., Кишинев).

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель технологических маршрутов на основе модифицированного аппарата сетей Петри.

2. Методика формирования производственных расписаний на предприятиях по переработке плодоовощного сырья.

3. Алгоритмы формирования производственных расписаний.

4. Прототип программного средства автоматизированного формирования производственных расписаний, включая реализацию представленных ранее алгоритмов.

**Соответствие паспорту специальности.** Проблематика, рассмотренная в диссертации, соответствует п. 4 «Теоретические основы и методы математического моделирования организационно-технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация» и п. 15 «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУ широкого назначения» паспорта специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (промышленность).

**Публикации.** По теме исследования опубликовано 11 научных работ; (в том числе 3 публикации в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России и 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений. Работа изложена на 137 страницах машинописного текста, включающего 34 рисунка, 8 таблиц, список литературы из 115 наименований, 3 приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе «Анализ специфики задачи формирования производственных расписаний, методов ее решения и инструментальных средств автоматизации на предприятиях по переработке плодоовощного сырья»** проведен обзор средств автоматизации, ориентированных на решение задачи формирования производственных расписаний, определен состав исходных данных для построения расписаний, составлен перечень внешних и внутренних факторов, влияющих на их исполнение, в том числе обусловленных спецификой переработки плодоовощного сырья.

Формирование производственных расписаний на промышленных предприятиях базируется на данных производственной программы, разработка которой осуществляется на основе сведений о доступных мощностях предприятия, возможности получения исходного сырья от поставщиков в определенном качественном и количественном состоянии, а также прогнозе спроса на изготавливаемую продукцию. Фактическое состояние мощностей, отклонения в графике поставок (если договора по ним уже заключены), брак или порча сырья, полуфабрикатов и готовой продукции могут в совокупности привести к срыву запланированных сроков отгрузки заказчикам или изменению объемов выработки готовой продукции, что не только повлечет убытки вследствие невыполнения договорных обязательств, но и может негативным образом сказаться на репутации предприятия и затруднить его взаимодействие с контрагентами в будущем. Так, именно выработка готовой продукции установленного уровня качества в заданном объеме к требуемому сроку служит одним из важнейших критериев оценки эффективности производственного расписания, при этом очевидно, что чем больше факторов влияет на реализацию производственных процессов, тем чаще должна осуществляться корректировка производственного расписания.

Для предприятий по переработке плодоовощного сырья процесс формирования производственных расписаний характеризуется следующими особенностями:

- качественное состояние используемого сырья и полуфабрикатов изменяется не только в результате технологической обработки, но и в процессе нетехнологического пролеживания, транспортировки, хранения, что обуславливает необходимость принятия решений о корректировке производственных расписаний в короткие сроки;

- реализуемые технологические маршруты переработки во многом пересекаются по видам используемых ингредиентов и оборудования, и, следовательно, при формировании производственных расписаний существует необходимость учета множества факторов и альтернативных вариантов загрузки оборудования, что представляет собой сложную задачу, и, как правило, входит в обязанности лица, принимающего решения, а значит, зависит от его квалификации, опыта и прочих обстоятельств принятия решения;

- потребность в корректировке производственных расписаний может возникнуть вследствие множества причин, в том числе, обусловленных сезонностью поступления плодоовощного сырья, влиянием агроэкологических факторов на его качественное состояние, возникновением различного рода форс-мажорных обстоятельств.

Таким образом, процесс формирования производственных расписаний представляет собой сложную вычислительную задачу, решение которой требует автоматизации. В ходе диссертационного исследования нами был проведен обзор представленных на рынке программных средств, реализующих функции формирования оперативно-календарных планов, детализированных производственных расписаний и

диспетчирования производства (автоматизированные системы APS-, MES- и FP&S-класса), в результате чего был сделан вывод о том, что такие системы, как правило, ориентированы на решение задач для дискретных производств, а также не обладают достаточным функционалом по формированию детализированных производственных расписаний и возможностью учета особенностей переработки плодоовощного сырья.

Таким образом, разрабатываемое программное средство автоматизированного формирования производственных расписаний для предприятий по переработке плодоовощного сырья должно обладать гибкими возможностями по настройке параметров реализуемых технологических маршрутов (ТМ), выполнять построение производственного расписания в сжатые сроки и с высокой степенью детализации относительно порядка и времени загрузки оборудования, а также позволять оценить возможные альтернативные варианты расписания с точки зрения ряда показателей, в том числе, потери сырья, производительность и простои оборудования, процент выполнения производственной программы и т.д.

Во второй главе «**Моделирование процесса формирования производственных расписаний по переработке плодоовощного сырья**» разработана математическая модель ТМ на основе предложенного автором модифицированного аппарата сетей Петри (МСП), позволяющая учесть специфику организации переработки плодоовощного сырья, а также методика формирования производственных расписаний, основанная на использовании указанной математической модели и дискретно-событийном подходе.

Совокупность технологических операций (ТО) для  $N$  реализуемых на предприятии различных ТМ задана следующим образом:

$$F = \bigcup_{n=0}^{N-1} F_n = \begin{bmatrix} f_{0,0} & f_{0,1} & \mathbf{K} & f_{0,L_0-1} \\ f_{1,0} & f_{1,1} & \mathbf{K} & f_{1,L_1-1} \\ \mathbf{K} & \mathbf{K} & \mathbf{K} & \mathbf{K} \\ f_{N-1,0} & f_{N-1,1} & \mathbf{K} & f_{N-1,L_{N-1}} \end{bmatrix},$$

где  $F_n$  – упорядоченное множество реализуемых ТО в рамках  $n$ -го ТМ;

$f_{n,l_n}$  – номер оборудования, используемого на  $l_n$ -ом этапе  $n$ -го ТМ;

$n$  – номер ТМ,  $n = \overline{0, N-1}$ ,  $N$  – суммарное число реализуемых ТМ;

$j$  – номер оборудования,  $j = \overline{0, J-1}$ ,  $J$  – суммарное число видов используемого оборудования;

$l_n$  – номер ТО в рамках  $n$ -го ТМ,  $l_n = \overline{0, L_n-1}$ ,  $L_n$  – суммарное число ТО в  $n$ -ом ТМ.

Для каждой ТО определено:

– множество ингредиентов  $X_{n,l_n}$ ;

– получаемый в результате полуфабрикат  $y_{n,l_n}$ ;

– время выполнения  $t_{n,l_n}$  и подготовительно-заключительное время  $t_{n,l_n}^0$ ;

– интервал времени нетехнологического пролеживания ингредиентов  $(r+1)$ -ой ТО после завершения  $r$ -ой ТО с сохранением уровня качества  $D(f_{n,r}, f_{n,r+1})$ , где  $r = \overline{0, L_n-2}$ .

Анализ применимости различных подходов к построению математической модели ТМ показал, что для решения поставленной задачи целесообразно использовать разработанный в ходе диссертационного исследования модифицированный аппарат сетей Петри, который в матричной форме задается следующим образом:

$$C = \langle S, T, M, D(S), D(T), \mu^0 \rangle,$$

где  $S$  – вектор-столбец, включающий идентификаторы вершин-позиций сети четырех типов:

$$S = \langle S^C, S^\Phi, S^B, S^B \rangle,$$

где  $S^C, S^\Phi, S^B, S^B$  – вектор-столбцы, включающие идентификаторы стартовых, финальных, внутренних и буферных вершин-позиций соответственно;

$T$  – вектор-столбец вершин-переходов сети;

$M$  – матрица инцидентности сети, построенная на основе заданных функций прямой и обратной инцидентности для вершин-переходов и вершин-позиций, элементы которой равны:

$$M[i, j] = \begin{cases} -v(i, j), & \text{в случае, если есть дуга из } S_i \text{ в } T_j, \\ 0, & \text{в случае, если есть нет дуг между } S_i \text{ и } T_j, \\ v(i, j), & \text{в случае, если есть дуга из } T_j \text{ в } S_i, \\ \infty, & \text{в случае, если есть петля между } S_i \text{ и } T_j; \end{cases} \quad (1)$$

где  $v(i, j)$  – вес маркера-ингредиента, находящегося в  $i$ -ой вершине-позиции, необходимый для срабатывания  $j$ -ой вершины-перехода,

$S_i$  – вершина-позиция,  $i = \overline{0, N-1}$ ,  $N$  – число вершин-позиций,

$T_j$  – вершина-переход,  $j = \overline{0, K-1}$ ,  $K$  – число вершин-переходов;

$D(S)$  – вектор-столбец, содержащий сведения о допустимых интервалах нахождения маркеров в вершинах-позициях сети, кроме буферных;

$D(T)$  – вектор-столбец, содержащий сведения о временных задержках, установленных для вершин-переходов;

$\mu^0$  – вектор-столбец, определяющий начальную разметку сети.

Пример графического отображения фрагмента модифицированной сети Петри (МСП) приведен на рисунке 1(а). В разработанной модифицированной сети Петри (МСП) определены четыре типа вершин позиций, при этом путь, образованный стартовыми, внутренними, финальными вершинами и вершинами-переходами соответствует ТМ. Буферная вершина-позиция может быть связана с одной или более вершиной-переходом только с помощью петли. Введение буферных вершин в МСП позволяет указать число единиц определенного вида оборудования, используемого для реализации ТО, обозначенной вершиной-переходом. Для указания того факта, что две или более вершины-перехода соответствуют ТО с эквивалентными видами используемого оборудования, данные вершины-переходы должны быть связаны с одной буферной вершиной-позицией (на рисунке 1(а) такие вершины дополнительно обведены пунктиром и указаны как переходы с  $P$ -/ $V$ - операциями). Разметка сети включает маркеры двух типов:

1) маркеры-ингредиенты, перемещение которых по сети от стартовых вершин-позиций (где они генерируются) до финальных (после помещения в которые маркеры удаляются из сети) осуществляется посредством срабатывания вершин-переходов и моделирует движение партий сырья и полуфабрикатов в ходе исполнения ТМ. При этом наличие маркера-ингредиента в вершине-позиции соответствует определенному качественному состоянию партии сырья (полуфабриката, готовой продукции), размещение маркеров данного типа в буферные вершины-позиции исключается. Особенностью маркеров-ингредиентов является введенный для них параметр – вес маркера, позволяющий отслеживать изменение веса для моделируемых партий;

2) маркеры-ресурсы, размещаемые в буферных вершинах-позициях, число которых указывает на количество единиц оборудования соответствующего вида. Число и исходное размещение маркеров-ресурсов в МСП задается в  $\mu^0$ .



Ключевым отличием предложенной модификации по отношению к известным описаниям сети Петри, ее модификаций и расширений является *наличие весов у маркеров-ингредиентов и необходимость их учета при определении разрешимости срабатывания вершин-переходов*, что позволяет моделировать динамику весов партий сырья (полуфабрикатов) при реализации ТМ.

Так, срабатывание вершины-перехода  $T_j$  в текущий момент модельного времени возможно, если

$$\forall j \in [0, K-1]: \forall i^* \in [0, N-1], (M[i, j] < \infty) \& (M[i^*, j] < 0) \& (Sv(i^*) \geq |M[i^*, j]|) = True,$$

где  $Sv(i^*)$  – суммарный объем маркеров-ингредиентов, находящихся в вершине-позиции  $S_{i^*}$  в текущий момент модельного времени.

На рисунке 1(б) представлен фрагмент МСП, где для срабатывания вершин-переходов  $T_1$  и  $T_2$  согласно (1) маркер-ингредиент из вершины-позиции  $S_2$  с весом  $v^*$  разделяется на два или более маркера-ингредиента:  $v(2,1) + v(2,2) \geq v^*$ , при этом срабатывание вершин-переходов  $T_2$  и  $T_3$  требует захвата маркера-ресурса из буферной вершины-позиции  $S_5$ .

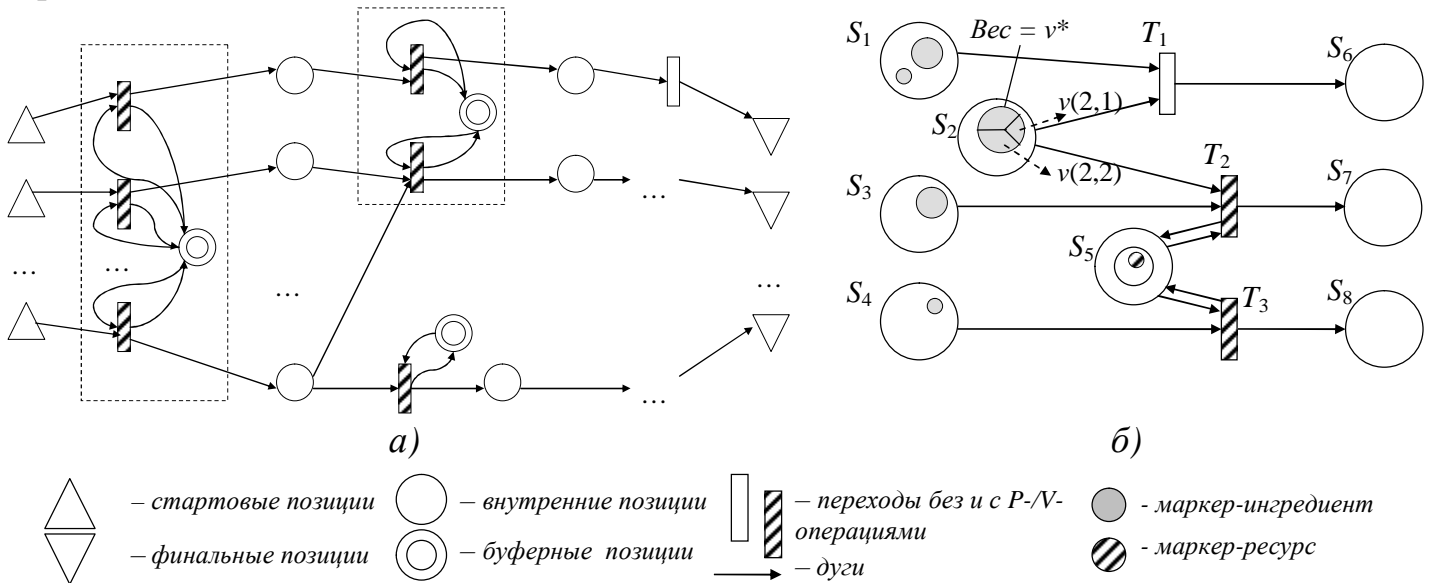


Рисунок 1: а) Пример графического отображения фрагмента модифицированной сети Петри; б) Пример определения разрешимости срабатывания вершин-переходов по весу маркер-ингредиентов

Таким образом, математическая модель ТМ в виде МСП позволяет учесть особенности их реализации и может быть положена в основу методики формирования производственных расписаний с высокой степенью детализации.

Предлагаемая нами методика построения производственных расписаний для таких предприятий представлена на рисунке 2. В качестве лица, принимающего решения, выбрана точка зрения плановика предприятия. Процесс формирования производственного расписания включает три этапа.

На *первом этапе* «Формализация описания реализуемых ТМ» осуществляется построение модели ТМ для множества видов выпускаемой продукции в виде МСП.

На *втором этапе* построения производственных расписаний «Формирование допустимых вариантов сценария производственного расписания» выполняется дискретно-событийное моделирование процесса производства указанных видов готовой продукции в заданном плановом периоде на основе построенной на предыдущем этапе модели ТМ. В дискретно-событийной модели формирования допустимых сценариев производственного расписания определено четыре типа событий: «Приход закупаемого сырья и полуфабрикатов (ЗСП)», «Высвобождение оборудования», «Профилактика оборудования», «Окончание моделирования». В результате моделирования формируется

множество допустимых сценариев производственного расписания. Число сценариев определяется, исходя из количества возникших в ходе моделирования ситуаций конкурентного доступа двух и более комплектов маркеров-ингредиентов к вершинам-переходам в моделируемом периоде.

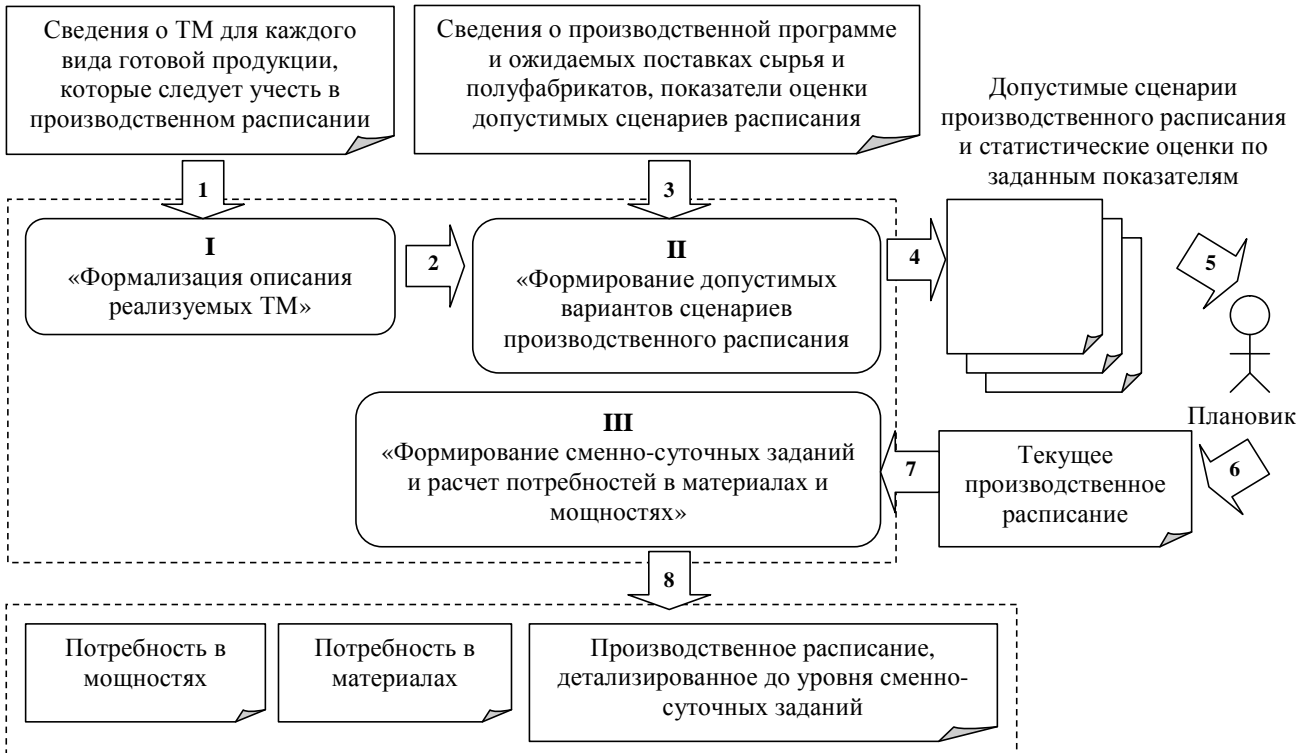


Рисунок 2 – Общая схема формирования производственных расписаний согласно предлагаемой методике

На рисунке 3 представлен фрагмент дерева допустимых сценариев с выделенными точками ветвления, в которых осуществляется выбор одного из доступных комплектов маркеров. Последовательность участков обработки между точками ветвления для выделенного периода планирования, например,  $A_0-A_1-A_4-A_6$ , образует один из множества допустимых сценариев. Для каждого сценария осуществляется сбор статистических данных, необходимых для расчета оценок по заданным показателям для каждого их вариантов сценариев.

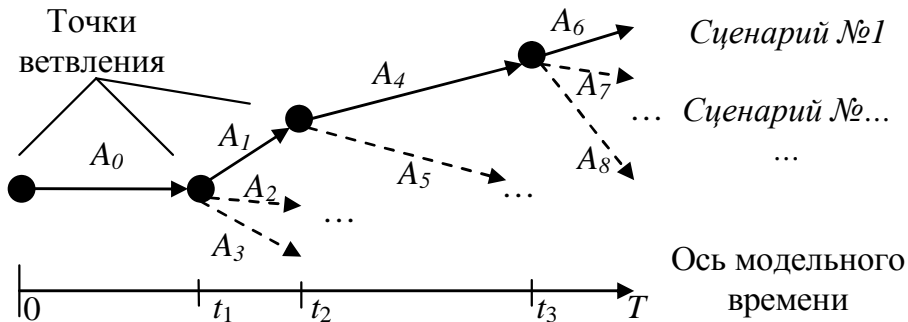


Рисунок 3 - Пример дерева допустимых сценариев с выделенными точками ветвления

В перечень показателей для сравнительной оценки допустимых вариантов сценария производственного расписания входят: процент отходов по видам сырья, объем незавершенного производства, коэффициент загрузки и пропускная способность оборудования, время нетехнологического пролеживания перед каждой ТО и др. На основании полученных оценок плановик может принять решение о том, какой из конечного набора допустимых сценариев производственного расписания целесообразно принять к исполнению.

На *третьем этапе* «Формирование сменно-суточных заданий и расчет потребностей в материалах и мощностях» на основе выбранного плановиком варианта сценария производственного расписания составляются сменно-суточные задания, а также рассчитываются уточненные потребности в материалах и мощностях.

В третьей главе «Разработка и исследование алгоритмов формирования производственных расписаний для предприятий по переработке плодоовощного сырья» предложены: алгоритм построения модифицированной сети Петри, представляющей собой математическую модель технологических маршрутов (ТМ); алгоритм формирования производственных расписаний на основе построенной модифицированной сети Петри (МСП), результатом работы которого является формирование допустимых сценариев производственного расписания. Указанные алгоритмы реализуют предложенную методику формирования производственных расписаний и используемую в ней модель ТМ. Алгоритм построения модели ТМ предполагает формирования МСП, где вершинам-переходам соответствуют технологические операции (ТО), принадлежащие тем или иным ТМ, а связанные с ними вершины-позиции указывают на используемое в качестве ингредиентов сырье (полуфабрикаты), а также получаемые в результате обработки полуфабрикаты (готовую продукцию). Общая схема алгоритма построения МСП представлена на рисунке 4.

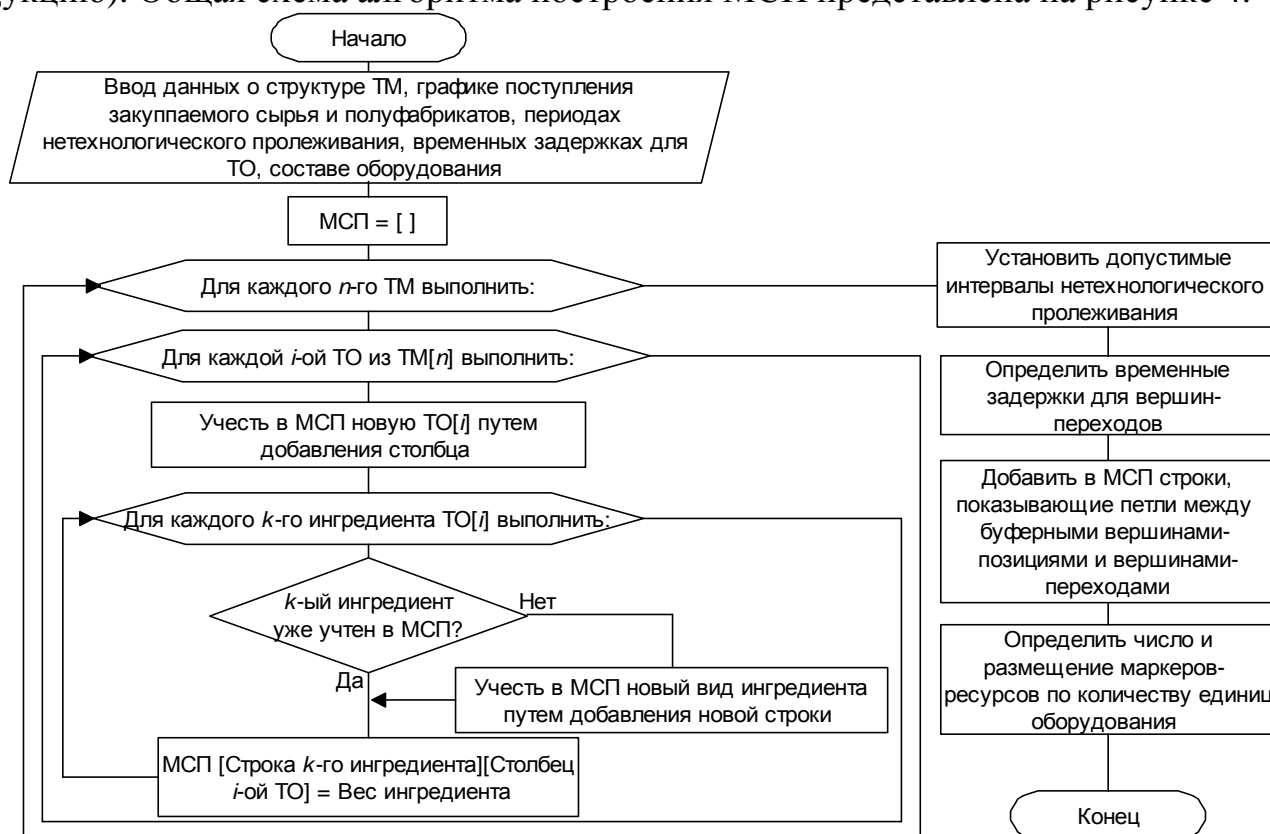


Рисунок 4 – Общая схема алгоритма построения модифицированной сети Петри при формировании производственных расписаний

На вход процедуры поступают сведения о ТО, для каждой из которых определено множество используемых ингредиентов и получаемых в результате обработки полуфабрикатов, времени обработки, допустимых интервалах нетехнологического пролеживания и график поставок закупаемого сырья и полуфабрикатов. Отношения входа и выхода между вершинами МСП отражаются в двумерной матрице инцидентности, которая обеспечивает возможность учета альтернативных путей использования ингредиентов. На завершающем этапе построения МСП задаются допустимые интервалы нетехнологического пролеживания по всем видам используемых

ингредиентов (т.е. для каждой вершины-позиции); временные задержки по каждой ТО (для вершин-переходов); число единиц оборудования и группы ТО, реализуемых на оборудовании одного вида (моделируется путем введения в матрицу инцидентности значений  $\infty$  и размещения маркеров-ресурсов в начальной разметке).

Сформированная МСП служит основой для проведения модельного эксперимента, в результате которого создаются допустимые варианты сценария производственного расписания. Движение партий сырья по этапам технологической обработки согласно предложенной методике моделируется путем создания маркеров-ингредиентов с заданными весами в стартовых вершинах-позициях, перемещению их по внутренним вершинам-позициям и вершинам-переходам вплоть до попадания в финальные вершины-позиции. Помещение маркера-ингредиента в вершину-позицию соответствует ситуации наличия партии сырья, полуфабриката в определенном качественном состоянии. Наличие кратного числа оборудования, а также его использования в различных ТМ моделируется путем помещения маркеров-ресурсов в соответствующие буферные вершины-позиции. Модельный эксперимент представляет собой последовательное в рамках заданного периода моделирования извлечения запланированных на текущий момент событий и их обработку согласно разработанным алгоритмам.

Алгоритм проведения модельного эксперимента предполагает, что всегда существует хотя бы один вариант сценария производственного расписания. При этом ключевую роль играет обработка события «Высвобождение оборудования», в рамках которой происходит оценка разрешимости срабатывания вершин-переходов сети. На рисунке 5 представлена общая схема алгоритма процедуры оценки разрешимости срабатывания вершин-переходов.

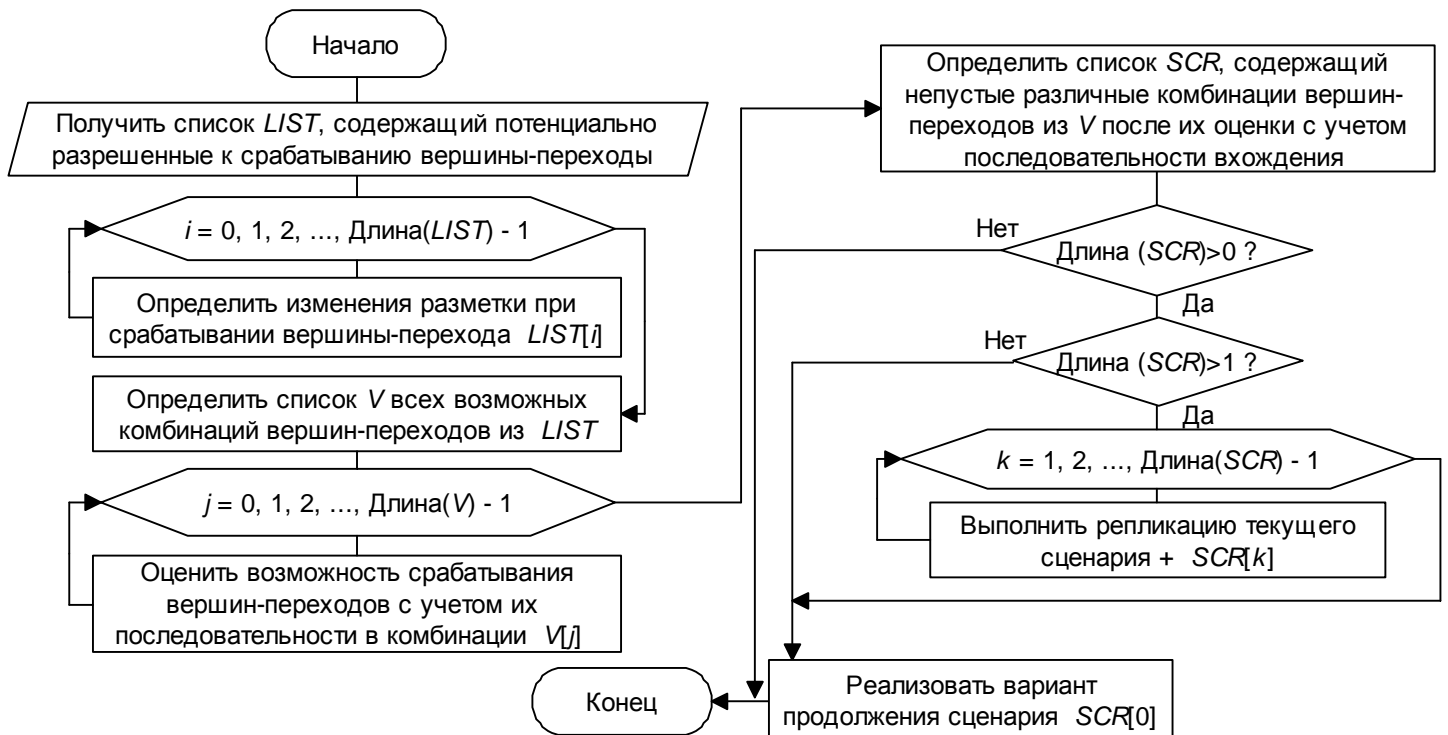


Рисунок 5 - Общая схема алгоритма процедуры оценки разрешимости срабатывания вершин-переходов

По окончании временной задержки вершина-переход высвобождается, в вершины-переходы распределяются маркеры-ингредиенты с заданными весами. Срабатывание вершины-перехода зависит от того, свободна ли она в текущий момент, и есть ли в каждой входной для нее вершине-позиции маркеры-ингредиенты с суммарным весом не менее установленного согласно (1), а также минимум один маркер-ресурс, если вершине-переходу инцидентна буферная вершина-позиция. Указанным условиям в ходе

обработки события «Высвобождение оборудования» потенциально соответствуют: 1) высвобожденная вершина-переход (так как теперь она свободна для новых маркеров); 2) вершины-переходы, которые следуют за высвобожденной через одну вершину-позицию, т.к. разметка (включая веса маркеров-ингредиентов) для них только что изменилась; 3) свободные вершины-переходы, которые связаны с буферной вершиной-позицией, инцидентной высвобожденной. В совокупности вершины-переходы, удовлетворяющие выше описанным условиям, образуют список *LIST* – список потенциально разрешенных вершин-переходов.

Для каждого *i*-го элемента списка *LIST* в цикле определяется, как изменится разметка сети, если *LIST[i]* будет возбуждена. Если текущая разметка не позволяет сработать вершине-переходу *LIST[i]*, то такая вершина исключается из дальнейшего рассмотрения. На основе скорректированного списка потенциально разрешенных к срабатыванию вершин-переходов строится список различных комбинаций вершин-переходов *V*. Для каждого *j*-го элемента списка *V*, при этом для *x* элементов число различных сочетаний с учетом порядка их вхождения составляет *x!* Вершины-переходы необходимо рассматривать в различном порядке, т.к. при определенных условиях срабатывание одной может приводить к блокировке другой. Оценка разрешимости срабатывания вершин-переходов с учетом последовательности позволяет выделить набор (список *SCR*) реально допустимых к единовременному срабатыванию вершин. Если после оценки найдена лишь одна допустимая комбинация *SCR[0]*, то она реализуется в продолжение текущего сценария, если таких сценариев два или более, то реализуется *SCR[0]*, а остальные запоминаются для новых сценариев путем репликации текущего.

В четвертой главе «Программная реализация средства формирования производственных расписаний для предприятий по переработке плодоовощного сырья» предложена программная архитектура, которая включает следующие компоненты: клиентское приложение, список прав доступа к которому определяется типом учетной записи, реализуется в главном исполняемом модуле; набор программных модулей, реализующих разработанные алгоритмы, обработку данных, введенных посредством программного приложения, а также взаимодействие с базой данных: модуль для построения запросов к БД; модуль для формирования МСП; модуль, реализующий модельный эксперимент, в результате которого определяется множество допустимых вариантов сценария производственного расписания; модуль для выгрузки данных сформированного расписания, уточненных потребностей в материалах и мощностях, сменно-суточных заданий в MS Excel; базу данных, поддерживаемую реляционной СУБД SQLite. На рисунке 6 представлена модульная структура программного средства.

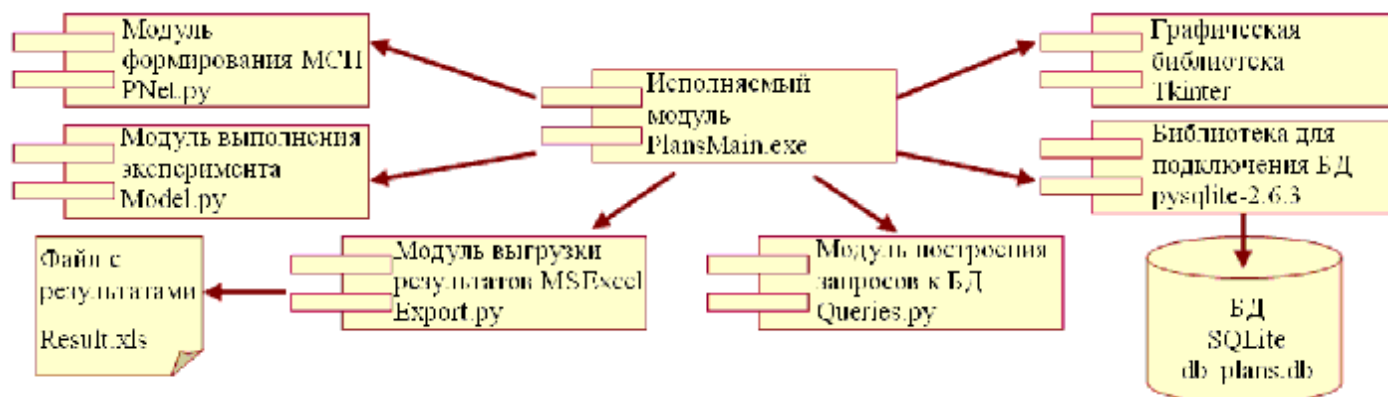


Рисунок 6 – Модульная структура программного средства формирования производственных расписаний

Набор программных модулей реализован в свободно распространяемой кроссплатформенной среде программирования Python версии 2.7. Клиентское приложение разработано с применением библиотеки Tkinter. База данных разработана с использованием СУБД SQLite, интерфейс подключения к которой реализован с использованием библиотеки pysqlite-2.6.3. Для крупных предприятий также разработана версия программного средства, взаимодействующего с клиент-серверной объектно-реляционной СУБД PostgreSQL версии 9.1 посредством библиотечного модуля psycopg2.py. Указанные библиотеки входят в состав библиотек Python и подключаются непосредственно из соответствующих программных модулей. В ходе проектирования программного средства была разработана структура реляционной базы данных, сущности и связи которой отражают специфику используемых при формировании производственных расписаний данных в контексте рассматриваемой предметной области. В соответствии с выделенными в ходе проектирования вариантами использования программного средства, составом исходных данных и требованиями к отображению результатов был предложен и реализован пользовательский интерфейс. Разработанное программное средство было протестировано и зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ. Выполнение расчетных примеров для набора ТМ, составленных в соответствии со справочником рецептов на плодоовощную продукцию, показало, что формируемые в результате моделирования различные допустимые варианты сценариев производственного расписания и рассчитанные оценки по заданным показателям дают возможность лицу, принимающему решения, осуществить сравнение и обоснованный выбор сценария расписания согласно целям и возможностям предприятия в текущий момент. Так, в результате моделирования исполнения совокупности ТМ для трех видов готовой продукции: «Икра баклажанная», «Икра кабачковая», «Икра луковая», производство которых характеризуется наличием множества общих ингредиентов и используемого оборудования, были получены набор допустимых вариантов сценариев производственного расписания, отличающиеся по показателям выработки готовой продукции и порчи сырья (полуфабрикатов). Экранные формы программного средства в режиме отображения результатов моделирования представлены на рисунке 7.

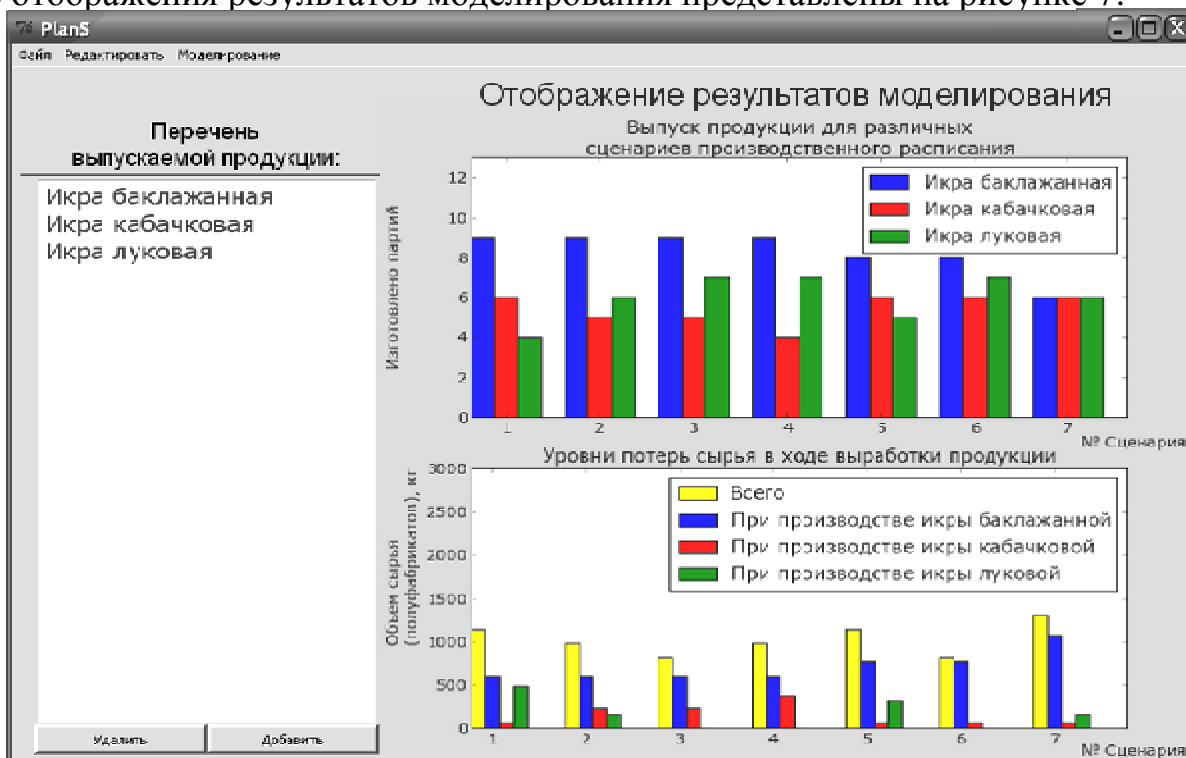


Рисунок 7 - Экранная форма программного средства в режиме отображения результатов

Прототип программного средства автоматизированного формирования производственных расписаний был внедрен на предприятии ООО «Пищевик» (г. Болхов), осуществляющее переработку плодоовощного сырья, изготовление консервной продукции широкого ассортимента. Внедрение позволило увеличить пропускную способность производственного оборудования на 6-8% и сократить потери плодоовощного сырья и полуфабрикатов на 5-10% за счет повышения качества и оперативности планирования работ.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача разработки моделей, алгоритмов и автоматизированных средств формирования производственных расписаний на предприятиях по переработке плодоовощного сырья. В ходе решения поставленной задачи были получены следующие результаты:

1. Проведен обзор средств автоматизации формирования производственных расписаний в представленных на рынке АСУП, исследована специфика задачи построения производственных расписаний на предприятиях по переработке плодоовощного сырья, которая заключается в необходимости учета изменений его качественного состояния и возможности использования в альтернативных технологических маршрутах.

2. Предложена математическая модель технологических маршрутов на основе модифицированного автором аппарата сетей Петри, позволяющая учесть особенности организации процессов переработки плодоовощного сырья. Разработан алгоритм построения модифицированной сети Петри.

3. Предложена методика формирования производственных расписаний на предприятиях по переработке плодоовощного сырья, основанная на использовании разработанной автором математической модели технологических маршрутов в виде модифицированной сети Петри.

4. Разработан алгоритм формирования производственных расписаний, основанный на дискретно-событийном подходе и построенной модифицированной сети Петри, результатом которого является построение допустимых вариантов сценариев производственного расписания и получение статистических оценок по ряду показателей для каждого из них.

5. Разработана структурно-функциональная модель программного средства автоматизированного формирования производственных расписаний для предприятий по переработке плодоовощного сырья, определен состав исходных данных, ключевые этапы и форма представления результатов их обработки, требования к программным средствам реализации программного средства, разработан пользовательский диалог.

6. Разработан прототип программного средства автоматизированного формирования производственных расписаний.

7. Прототип программного средства автоматизированного формирования производственных расписаний внедрен на предприятии ООО «Пищевик» (г. Болхов), осуществляющем переработку плодоовощного сырья. Использование программного средства автоматизированного формирования производственных расписаний позволило увеличить пропускную способность производственного оборудования на 6-8% и сократить потери плодоовощного сырья и полуфабрикатов на 5-10% за счет повышения качества и оперативности планирования работ.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России

1. Савва, Т.Ю. Разработка математической модели загрузки оборудования на предприятии по переработке скоропортящегося сырья [Текст] / Т.Ю. Савва // Информационные системы и технологии. – 2012. – № 6. – С. 47-56.
2. Савва, Т.Ю. Разработка алгоритмов построения модифицированной сети Петри при формировании производственных расписаний для предприятий по переработке плодоовощного сырья [Текст] / Т.Ю. Савва // Информационные системы и технологии. – 2013. – № 4 (78). – С. 36-46.
3. Савва, Т.Ю. Разработка модифицированного аппарата сетей Петри для моделирования систем с переменными характеристиками используемых ресурсов [Текст] / Т.Ю. Савва // Научные ведомости БелГУ. – 2013. - № 8 (151), выпуск 26/1. – С. 167-174.

### Публикации в рецензируемых журналах и сборниках международных и всероссийских конференций

4. Савва, Т.Ю. О задаче оперативного планирования загрузки оборудования на предприятии по переработке скоропортящегося сырья [Текст] / Т.Ю. Савва // «Инновационные информационные технологии». Материалы международной научно-практической конференции. – М.: МИЭМ, 2012. – С. 450-455.
5. Савва, Т.Ю. Математическое моделирование переработки скоропортящегося сырья [Текст] / Т.Ю. Савва // «Прикладная математика, управление и информатика». Сборник трудов международной молодежной конференции в 2 т. – Т.1. – Белгород: ИД «Белгород», 2012. – С. 256-259.
6. Савва, Т.Ю. Моделирование загрузки оборудования на предприятии по переработке скоропортящегося сырья с использованием расширенного аппарата сетей Петри [Текст] / Т.Ю. Савва // «Специалист 21 века: экономическое образование в обеспечении устойчивого развития человеческого потенциала». Сборник материалов Российской научно-практической конференции с международным участием. – Пермь: Перм. гос. гуманитар.-пед. ун-т. – 2012. – С. 310-311.
7. Савва, Т.Ю. Анализ процесса формирования плана-графика производства на предприятии по переработке скоропортящегося сырья в ходе разработки АИС [Текст] / Т.Ю. Савва // «Инновационные информационные технологии». Материалы международной научно-практической конференции в 4 т. – Т.3. – М.: МИЭМ, 2013. – С. 337-345.
8. Савва, Т.Ю. Формализация описания технологических процессов переработки плодоовощного сырья при формировании производственных расписаний [Электронный ресурс] / Т.Ю. Савва // Сетевое научное издание «Информационные ресурсы, системы и технологии». – Режим доступа: <http://www.irsit.ru/files/article/338.pdf>.
9. Савина, О.А. Формирование производственных расписаний для предприятий по переработке плодоовощного сырья на основе дискретно-событийного моделирования [Электронный ресурс] / О.А. Савина, Т.Ю. Савва // Сетевое научное издание «Информационные ресурсы, системы и технологии». – Режим доступа: <http://www.irsit.ru/files/article/336.pdf>. (личное участие 50%)
10. Savina, O.A. About new modification of Petri nets with dynamic weights of tokens [Текст] / O.A. Savina, T.Yu. Savva // Proceedings of the International Conference on Intelligent Information Systems (IIS2013). Chisinau, Republic of Moldova. – 2013. – С. 52-57. (личное участие 50%)
11. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2013618660 «Программное средство формирования производственных расписаний для предприятий по переработке плодоовощного сырья» / Т.Ю. Савва.– Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 13.09.2013г.

ЛР ИД №0067 от 05.01.2000 г.

Подписано к печати 01.11.2013 г. Формат 69×84/16. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 169

Полиграфический отдел ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК»  
302030, г. Орел, ул. Московская, 65