

Ю.С. Мануйлов,
доктор техн. наук;
В.В. Шмелев,
кандидат техн. наук;
А.В. Богданов

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ НА ОСНОВЕ СЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

В статье предложен способ формализации комплексов операций по выполнению специальной задачи или достижению целевого эффекта при функционировании технических систем космических средств. Предлагается графовая модель технологического процесса в виде совокупности универсальных схем, созданных на основе модифицированных сетей Петри. Модель обеспечивает возможность управления траекторией развития процесса. Описываются варианты задания технологических, ресурсных, временных и краевых ограничений на траекторию развития технологического процесса. В рамках предлагаемой модели формализуется критерий оптимальности выполнения технологического процесса.

Ключевые слова: технологический процесс, моделирование процессов, сети Петри, оптимальное управление процессом.

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие информационных технологий позволяет реализовать на практике концепцию Единого информационного пространства [1], в том числе и в такой технически и организационно сложной области деятельности, как космическая деятельность. Одной из проблем, подлежащих решению, является отсутствие единых принципов моделирования технологических процессов целевого функционирования космических средств (КСр) и, как следствие, возможностей управления такими процессами из единого центра (пункта).

В практике ведения технологической документации, в специальном программном обеспечении сопровождения жизненного цикла объектов ракетно-космической техники технологические процессы (ТП) отображают в различном виде: например, в виде специальных карточек хронометража. В таких карточках информация о каждой операции представляется в виде таблиц – по столбцам: название операции, планируемое время начала и окончания, продолжительность операции. Также может присутствовать информация об исполнителях, используемых системах и ресурсах.

Возможно отображение ТП в графическом виде: технологические и сетевые графики, карты и т.д. В космической отрасли графическое отображение ТП принято называть циклограммой данного процесса. По оформлению и содержанию технологический график (циклограмма) является разновидностью диаграммы Ганта (ДГ) [2].

Приведенные способы описания ТП приняты и для отображения процессов подготовки и пуска ракеты-носителя, и для отображения процессов функционирования космических аппаратов, и для отображения ТП обработки и анализа измерительной информации и пр.

В практике обработки и анализа измерительной информации, а также функционирования космических средств, конечно, главенствующее место занимают нерегулярные или событийные процессы [3]. Описывать такие процессы целесообразнее всего с помощью упорядоченных множеств. Это позволяет добиться экономичности в вычислениях, высокой степени адекватности реальному ТП, так как он сам развивается пошагово.

Математическая модель ТП, описывающая ДГ и используемая в настоящее время при управлении процессами функционирования КСр, представляет собой так называемую рекурсивную модель. Для характеристики каждой операции вводится неотрицательная переменная

y – по смыслу, например, степень выполнения операции. В проекции на ось времени j -й ТП может быть записан с помощью рекурсивной модели (a – задержка перед началом выполнения операции, n – количество операций в ТП):

$$\begin{cases} y_1^j = a_1^j + T_1^j \\ y_2^j = y_1^j + a_2^j + T_2^j \\ \dots \\ y_n^j = y_{n-1}^j + a_n^j + T_n^j \end{cases} \quad (1)$$

В результате систематизации практического использования рекурсивной модели ТП в информационном обеспечении производства, испытаний и применения КСр можно сформулировать ее недостатки.

1. Отсутствует единое методическое обеспечение автоматической генерации моделей ТП на основе рекурсивных моделей.
2. Рекурсивная модель непригодна для случая отслеживания и контроля невременных (событийных) процессов, обладающих свойством нерегулярности.
3. Преобразование событийного процесса в регулярный приводит к возрастанию вычислительной сложности процессов контроля.
4. С помощью рекурсивной модели неудовлетворительно моделируются условные операции.
5. На практике проявляется чрезмерная громоздкость моделирования сложных, вложенных ТП.
6. Затруднительно использование внешней информации.
7. Отсутствует методическое обеспечение автоматической перестройки модели ТП при изменении приоритетности, условий или характеристик операций.
8. Отсутствует единое методическое обеспечение по верификации модели ТП.

Причиной указанных недостатков является именно используемая модель ТП. Для устранения недостатков необходимо разработать новую модель ТП и соответствующие алгоритмы синтеза, отслеживания (контроля) и корректировки модели.

В работе [4] описан подход к моделированию технологических процессов на основе модифицированных сетей Петри [5, 6]. Главным содержанием подхода является использование неизменной конструкции на основе сети Петри для моделирования всех операций ТП. В работе предложена «Универсальная схема технологической операции» – модель элементарной технологической операции (ТО). Данная модель является максимально общей и одновременно адаптированной для существующих типов взаимосвязей операций в предметной области информационного обеспечения производства, испытаний и применения КСр.

Представляется актуальным рассмотрение функционирования указанной модели с применением технологических, ресурсных, временных и краевых ограничений на траекторию развития ТП. Это позволит в дальнейшем разработать методы решения оптимизационной задачи на созданной модели ТП.

ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Достоинством предложенного в работе [4] подхода к моделированию технологических процессов является универсальность схемы элементарной ТО. Под элементарной ТО понимается операция ТП, которая не подлежит делению и является нижним уровнем в иерархической структуре всего ТП. Свойство универсальности схемы ТО заключается в ее адаптации к реализации условных операций, невременного контроля, вложенности и иерархичности структуры всего ТП.

По причине универсальности схемы ТО совокупность элементов сети Петри, за исключением входных и выходных позиций, может быть заменена специальным переходом-процедурой, который и является универсальной схемой ТО (УСТО). Схема обобщения ТО изображена на рис. 1. Переход-процедура УСТО обозначен прямоугольником с двойными линиями. В левой части приведены все входные позиции, определяющие ход ТО. В правой части приведены все выходные (индикаторные) позиции, показывающие ход ТО. Внутри перехода-процедуры показаны значения длительностей задержки начала выполнения (<ЗН>), задержки окончания выполнения (<ЗК>) и непосредственно выполнения операции (<Длит>).

Переход-процедура является удобным средством компактного отображения процессов, когда вместо громоздкого объема внутренних позиций и переходов схемы модели ТП (смотри схему сети Петри в работе [4], содержащую порядка 40 элементов) используется только одно изображение перехода-процедуры.

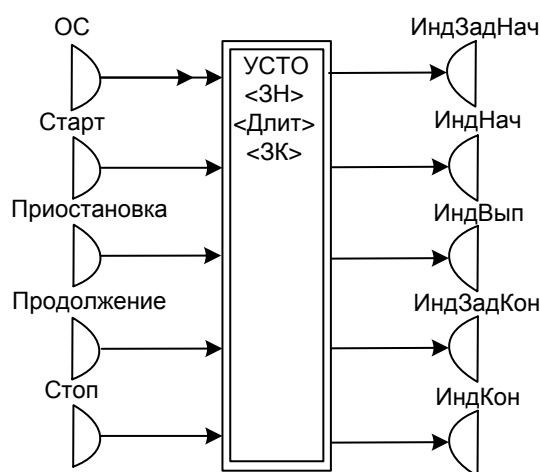


Рис. 1. Обобщенная схема операции

Позиции «Старт», «Стоп», «Приостановка» и «Продолжение» являются позициями, содержащими управляющие сигналы. Получение фишек данными позициями приводит к началу выполнения ТО («Старт»), к окончанию выполнения ТО («Стоп»), к временной приостановке и продолжению выполнения ТО. Данные позиции обеспечивают выполнение требования управляемости модели ТП. Управляющие позиции являются бинарными. Позиция «ОС» (отсчет событий) содержит информацию о наступлении очередного элементарного события, используемого в качестве «счетчика» степени выполнения ТО. В качестве элементарных событий могут использоваться как временные метки, так и события невременного характера, например результаты телеизмерений систем КСр. Особенным является то, что в модели не анализируются значения или содержание фишки, а используется только факт ее получения.

Позиции «ИндЗадНач» (индикация значения задержки начала выполнения ТО), «ИндНач» (индикация непосредственного начала выполнения ТО), «ИндВып» (индикация значения степени выполнения ТО), «ИндЗадКон» (индикация значения задержки окончания выполнения ТО) и «ИндКон» (индикация факта окончания выполнения ТО) являются индикаторными и обеспечивают наблюдаемость модели ТО. Данные позиции должны использоваться для определения траектории развития ТП путем сравнения значений в данных позициях с некоторыми эталонами. Индикаторные позиции «ИндЗадНач», «ИндВып» и «ИндЗадКон» являются по содержанию счетными, так как содержат количество отсчетов событий, полученных за интервал отсчета, соответственно задержки начала выполнения, непосредственного выполнения и задержки окончания выполнения операции. Позиции «ИндНач» и «ИндВып» являются бинарными и «сигнализируют» о фактах соответственно начала и окончания выполнения операции.

АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ К НАЛОЖЕНИЮ ОГРАНИЧЕНИЙ НА ТРАЕКТОРИЮ МОДЕЛИРУЕМОГО ПРОЦЕССА

Многообразие используемых в ТП приборов и агрегатов, зачастую, многофункционально, т. е. ТП может выполняться исполнительными системами в различных режимах, а также составом различных подсистем.

На порядок выполнения операций, входящих в ТП, для обеспечения требуемой эффективности технологией предусматривается определённая система ограничений, называемая технологическими ограничениями. Технологические ограничения, как правило, устанавливают так называемую систему (множество) технологических отношений между операциями. При этом множество отношений может включать в себя четыре вида технологических отношений:

- отношение совместности, означающее, что объединённая данным отношением группа операций должна выполняться строго одновременно;
- отношение несовместности, означающее, что операции, объединённые данным отношением, по тем или иным причинам вместе (одновременно) выполняться не могут;
- отношение следования, означающее, что объединённые данным отношением операции должны быть разделены на две группы – предшествующие и следующие с обязательным условием, что выполнение следующих операций может быть начато только после полного завершения выполнения группы предшествующих операций;
- отношение безразличия дополняет систему отношений до полной за счёт объединения данным отношением в одну группу операций, не вошедших ни в одну из ранее перечисленных групп.

Реализуем отношения совместности, несовместности и следования с помощью обобщенной модели операции, представленной на рис. 1.

Отношение совместности можно реализовать соединением моделей операций 1 и 2 в соответствии с рис. 2.

Управляющие сигналы для всех входных позиций дублируются, тем самым реализуется одновременное выполнение операций 1 и 2.

На рис. 3 представлена реализация отношения несовместности операций 1 и 2 на примере входной позиции «Старт». Аналогичным образом следует повторить конструкцию и для остальных входных позиций за исключением позиции «ОС».

Отношение следование реализуется «склеиванием» соответствующих выходных и входных позиций (рис. 4).

Отношение безразличия не требует отдельных пояснений реализации.

Кроме технологических ограничений на выполнение ТП могут накладываться также ресурсные ограничения. При этом ограничения могут накладываться как на скорость, так и на объём расходования технического (аппаратно-программного), различных видов энергетического, специального и временного ресурсов. Ограничения на расходование технического ресурса обусловлены тем, что приборы и агрегаты в значительной степени являются многофункциональными и могут работать в нескольких режимах. При этом они могут задействоваться в работе нескольких комплексов или систем, а также использоваться при выполнении совершенно различных операций.

Для реализации ресурсных ограничений следует внести в схему рис. 1 дополнительную входную позицию «Ресурс» (рис. 5). Количество фишек в позиции «Ресурс» определяет количество имеющегося запаса ресурса и обеспечивает реализацию ограничения на объём расходования ресурса. Выходящая дуга <PE> (ресурсоемкость) является кратной ресурсоемкости выполнения операции. Данным способом реализуется ограничение на скорость расходования ресурса. Переход «ИзмСостТО» (изменение состояния ТО) срабатывает только при наличии необходимого запаса ресурсов.

Таким образом, при каждом шаге выполнения операции из позиции «Ресурс» будет извлекаться количество фишек, равное ресурсоемкости операции.

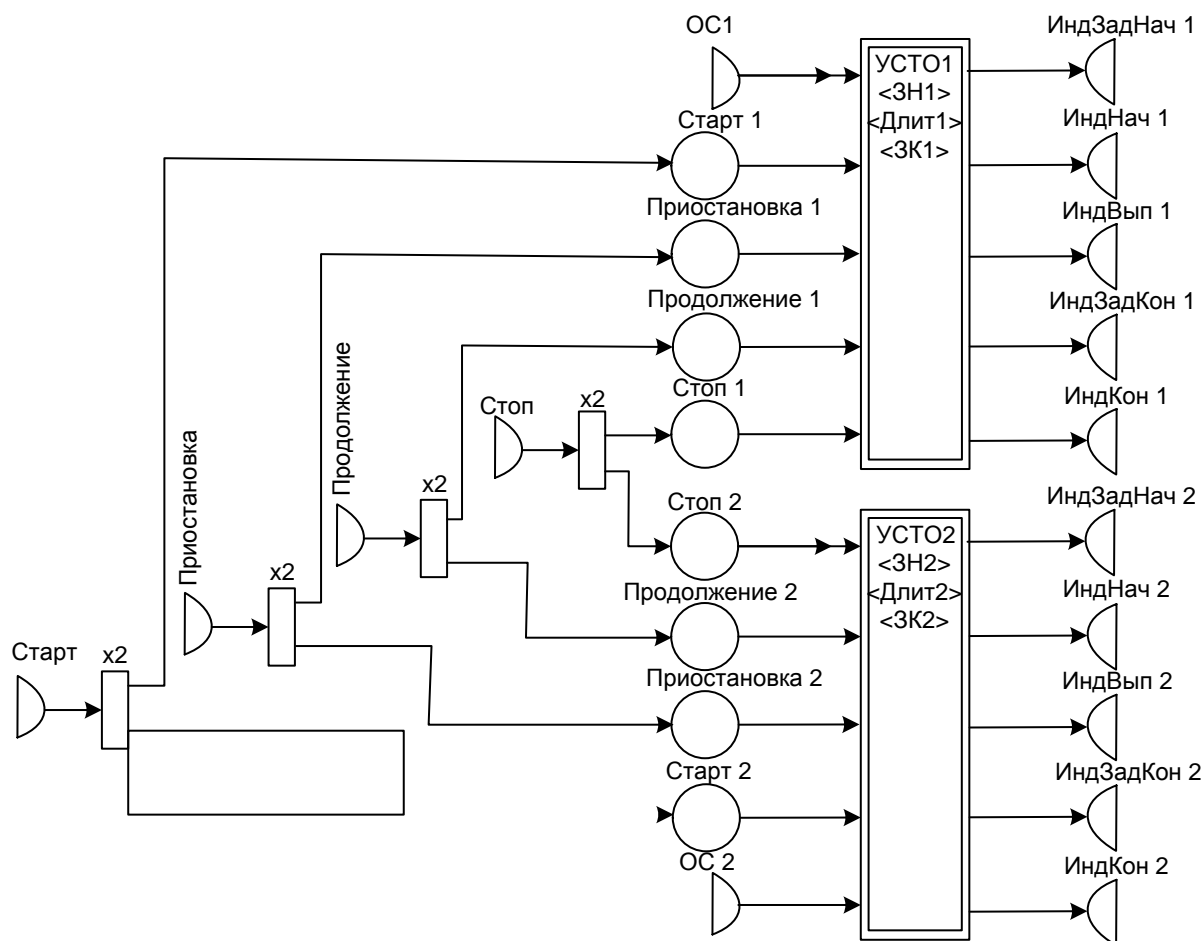


Рис. 2. Реализация отношения совместности

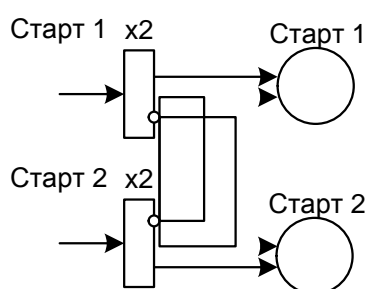


Рис. 3. Реализация отношения несовместности

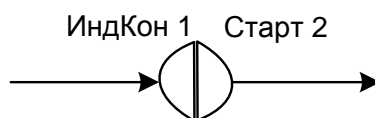


Рис. 4. Реализация отношения следования

Временные ограничения или ограничения на временной ресурс являются особым видом ограничений, которые также можно разделить на дифференциальные и интегральные. Такие

виды ограничений реализуются через контроль количества отсчетов событий, т.е. количество сформированных фишек в позициях «ОС». Интегральные временные ограничения реализуются через подсчет общего количества фишек, полученных позициями «ОС», а дифференциальные – через подсчет количества фишек в позиции «ОС», отработанных непосредственно ограниченными операциями.

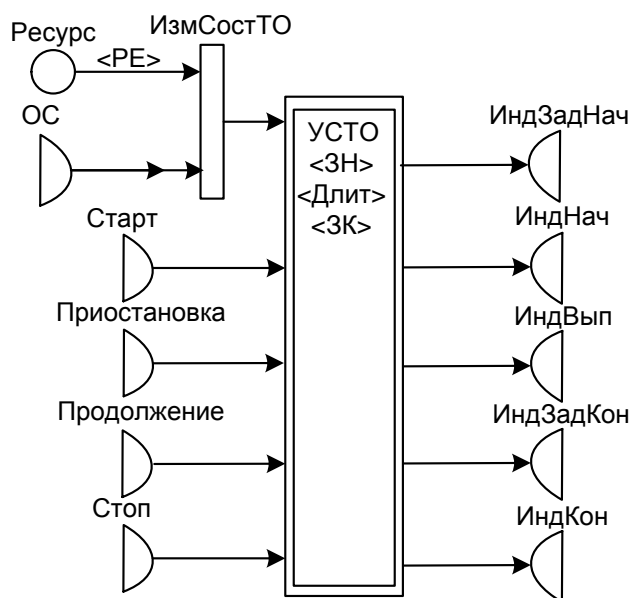


Рис. 5. Реализация ресурсных ограничений

Краевые или граничные условия, накладываемые на вектор состояния ТП, формируются определенным образом. В обязательном порядке устанавливаются граничные условия на левом конце траектории движения ТП.

Краевые же условия, накладываемые на вектор состояния ТП на правом конце траектории, могут быть сформированы в трёх вариантах:

- отсутствие ограничений на правом конце траектории – «свободный правый конец», означающее, что дополнительные сведения (пожелания), определяющие желаемый характер результирующей траектории, будут сформулированы в процессе формализации показателя качества или системы (вектора) показателей качества рассматриваемой задачи в оптимизационной постановке. Следует отметить, что данный вариант задания граничных условий максимально «расширяет» так называемую область допустимых альтернатив управления;
- ограничения на правом конце в виде некоторой области – «подвижный правый конец», несколько «сужающие» область допустимых альтернатив управления, но обеспечивающие поиск не только оптимизационных, но и сатисфакционных (удовлетворяющих всей системе ограничений) решений;
- точечные граничные условия – «закреплённый правый конец», означающие требование выполнения конкретного условия, максимально «сужающие» область допустимых альтернатив управления.

Реализация всех подобных краевых ограничений реализуется через кратность дуг <ЗН>, <Длит> и <ЗК>, которые могут задаваться и интервально, и точно. Именно данные величины определяют требуемые длительности задержки начала и окончания ТО, а также требуемую длительность непосредственного выполнения ТО.

Перечисленное многообразие ограничений, накладываемых на процесс выполнения ТП, сужает множество допустимых альтернатив реализации этого процесса. Однако если множество допустимых альтернатив содержит более одного варианта, то задача выполнения ТП может быть сформулирована и в оптимизационной постановке, в которой предъявляются до-

полнительные требования к качеству процесса, например по расходованию тех или иных видов ресурсов или степени полноты выполнения объёма ТП. Эти требования формализуются в виде системы показателей качества.

ФОРМАЛИЗАЦИЯ КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Критерий оптимальности (оптимизации) в обобщённом виде предъявляет требования к выбору оптимальной (наилучшей из всех возможных) альтернативы управления выполнением ТП. При его создании используются показатели качества, сконструированные на предыдущем шаге формализации задачи оптимального управления (на этапе определения ограничений). Критерий должен однозначно определять состав используемых показателей и направление устремления их к экстремуму (максимуму или минимуму) в процессе оптимизации управления. Для оптимизационной задачи с унипредпочтением (одним показателем качества) критерий оптимизации в обобщённой форме будет иметь вид

$$U_{opt}(T) = \arg \min_{U \in U_{\Delta}} \{J(U, X, X_f)\}, \quad (2)$$

и означает, что оптимальной реализацией управления ТП на временном интервале T будет $U_{opt}(T)$, являющаяся аргументом, минимизирующим показатель качества $J(U, X, X_f)$ на области (множестве) U_{Δ} допустимых альтернатив управления, т. е. альтернатив, удовлетворяющих всей системе ограничений, X, X_f – текущее и требуемое (финальное) состояние операции. В рамках модели рис. 1 имеем $U_{opt}(T)$ – это последовательность выдачи управляющих сигналов на входные позиции, T – интервал отсчетов событий, X – количество фишек в выходных позициях «ИндЗадНач», «ИндВып» и «ИндЗадКон».

Форма представления критерия оптимальности в виде (2) считается стандартной, поскольку любая задача, связанная с максимизацией показателя качества, сводится к задаче поиска его минимума простой сменой знака в конструирующих его функциональных зависимостях.

Основой для формирования области допустимых альтернатив управления является исходная область допустимых управлений U с учетом принятой в задаче системы ограничений. При этом процесс учета различных ограничений при формировании области допустимых альтернатив управления называют процессом сужения области допустимых управлений, так как количество допустимых альтернатив, действительно, не увеличивается, а только уменьшается.

Процедура «сужения» области допустимых управлений может быть проведена в три этапа.

При этом на первом этапе область допустимых управлений «сужается» за счет применения дифференциальных ресурсных ограничений, накладываемых на весь интервал планирования. Получаемая область может быть названа модифицированной областью допустимых альтернатив.

На втором этапе полученная модифицированная область допустимых альтернатив может быть «сужена» за счет применения системы функциональных пространственно-временных ограничений. Такая область может быть названа локальной модифицированной областью допустимых альтернатив, поскольку зависит от текущего значения временного параметра.

На третьем (последнем) этапе локальная модифицированная область допустимых альтернатив может быть «сужена» за счет учета технологических ограничений, а также интегральных ресурсных ограничений и обобщённых краевых условий. Получаемая в результате всех преобразований область вариаций управляющих параметров называется областью допустимых альтернатив управления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка информационной системы в соответствии с предлагаемой на рис. 1 моделью ТП позволит процесс автоматизированного проектирования, верификации, контроля выполнения, коррекции и перепланирования моделей технологических процессов в КСр организовать по новой технологии. Это решит задачу совершенствования специального программного обеспечения сопровождения производства, испытания и применения КСр и позволит достичь следующего эффекта. Многообразие сложных, вложенных, взаимозависимых, не предопределённых ТП функционирования КСр возможно будет в автоматизированном режиме в масштабе времени, близком к реальному, формализовать для оперативного управления.

Формализация критерия оптимальности выполнения ТП, построенного на представленной модели, позволяет применять все множество известных стратегий и локально-оптимального [7], и строго оптимального [8] управления.

Список используемых источников

1. Концепция информатизации Роскосмоса (2010 – 2015 г.г.). Федеральное космическое агентство – URL: <http://www.federalspace.ru/2158> (дата обращения: 27.02.2015).
2. Единая система технологической документации. Термины и определения основных понятий. ГОСТ 3.1109-82. – М.: Стандартинформ, 2012. – 14 с.
3. Лескин А.А., Мальцев П.А., Спиридов А.М. Сети Петри в моделировании и управлении: Наука, 1989. – 133 с.
4. Шмелев В.В. Модели технологических процессов функционирования космических средств // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 4. – С. 78–93.
5. Котов В. Е. Сети Петри. – Наука, 1984. – 160 с.
6. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / пер. с англ. М.В. Горбатовой и др. – М.: Мир, 1984. – 264 с.
7. Мануйлов Ю.С., Шмелев В.В. Алгоритм локально-оптимального управления комплексом операций // Наукоемкие технологии в космических исследованиях Земли. – 2014. – Т. 6, – № 5. – С. 22–26.
8. Шмелев В.В. Оптимальное планирование технологического процесса методом динамического программирования // Научное обозрение. – 2014. – №12. – С. 777–780.