

Системный анализ, управление и автоматизация

УДК 658.3

РАЗВИТИЕ ОРГАНИЗАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ВЕРТИКАЛЬНО ИНТЕГРИРОВАННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ СВЯЗИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

А.Я. Белобоков¹, Б.Я. Лихтциндер²

¹ ЗАО «БЕНЕФИТ»
620000, г. Екатеринбург, ул. Р. Люксембург, 19

² Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики
443010, г. Самара, ул. Льва Толстого, 23
E-mail: lixt@samtel.ru

Рассматриваются организационные структуры вертикально интегрированных телекоммуникационных предприятий. Показана целесообразность реорганизации ОАО «Ростелеком» и создания двух федеральных филиалов: «мультисервисного» и «мультисервисного».

Ключевые слова: *предприятия связи, структура управления, федеральные филиалы, районные узлы связи.*

Современные телекоммуникации развиваются весьма быстрыми темпами. Особенно это относится к сфере доступа абонентов к услугам связи. Вместо обычной телефонии доступ стал мультисервисным, а число абонентов конкретных услуг и объем трафика растут стремительными темпами. Именно в сфере доступа и услуг проявилась наиболее жесткая рыночная конкуренция между предприятиями отрасли.

При этом предприятия связи и телекоммуникаций имеют тенденцию к перераспределению численности между техническим персоналом и персоналом продаж и сервиса в пользу последнего при наличии тренда на постепенное снижение общей численности персонала в целом.

Важно отметить, что современные опорные и транспортные сети, системы коммутации и мультисервисные узлы доступа высокотехнологичны в эксплуатации, в том числе из единого центра. Таким образом, тренд в технологических подразделениях предприятий связи и телекоммуникаций объективно направлен на сокращение персонала с одновременным ростом его заработной платы за счет высокой квалификации и упрощения соответствующей организационной структуры.

В целом требования к организационной структуре предприятий в высокой степени определяются потребностью и одновременно способностью высшего руководства предприятия адекватно управлять его развитием в условиях внутренних и внешних вызовов с максимальной синергией для предприятия.

Согласно модели Л. Грейнера [1], предприятие в своем развитии проходит пять основных этапов роста (через творчество, через директивное руководство, через де-

*Андрей Яковлевич Белобоков (к.т.н.), советник генерального директора.
Борис Яковлевич Лихтциндер (д.т.н., проф.), профессор кафедры МСИБ.*

легирование, через координацию, через сотрудничество) и, соответственно, четыре межэтапных кризиса (лидерства, автономии, контроля, границ). Представляется, что предприятия отрасли телекоммуникаций РФ, будучи фактически и исторически молодыми, вплотную подошли (либо вернулись) к третьему этапу развития по Л. Грейнеру и должны преодолеть кризис автономии путем управляемого делегирования необходимых полномочий от центра к нижним уровням управления.

Практическими организационными решениями для вертикально интегрированного [2] предприятия связи и телекоммуникаций при реализации управляемого делегирования полномочий могут быть:

1) разделение предприятия на два дивизиона: «технологический» и «бизнес», при этом «бизнес»-дивизион является заказчиком по отношению к «технологическому» дивизиону в качестве держателя инвестиционного бюджета предприятия. Границы ответственности «технологического» дивизиона по отношению к уровням сети могут быть определены как «опорная базовая сеть – транспорт – коммутация – мультисервисные узлы доступа». Границы «бизнес»-дивизиона по отношению к уровням сети могут быть определены как «распределительная сеть – последняя миля – абонентские устройства». «Бизнес»-дивизион покупает ресурсы и трафик у «технологического» дивизиона, тем самым создавая горизонтальное звено хозрасчета на уровне предприятия. Задача «технологического» дивизиона определяется как выполнение заказа «бизнес»-дивизиона с минимальными инвестиционными и операционными издержками, при этом разница между стоимостью заказа «бизнес»-дивизиона и операционными издержками на его исполнение остается в распоряжении «технологического» дивизиона. В случае реализации указанного подхода и при сохранении в организационной структуре макрорегионального деления «технологический» дивизион на уровне макрорегиона является одноуровневым, а «бизнес»-дивизион – двухуровневым, где низовым звеном является районный узел связи;

2) переход на двухуровневую структуру управления по вертикали в звене «макрорегион – районный узел связи» с одновременной передачей максимума возможных полномочий и самоуправления низовым структурам предприятия. При этом ликвидируется управленческое звено на уровне региона, что немедленно приводит как к сокращению численности управленческого персонала предприятия, так и к быстрому прохождению управляющих сигналов сверху и отклика и предложений снизу. Тем самым восстанавливается замкнутый контур управления предприятием (обратная связь), который в многоуровневой системе управления наиболее подвержен разрушению;

3) введение ключевого изменения в системе управления, мотивации и бюджетирования предприятия, а именно переход низовых звеньев управления (районных узлов связи) на внутренний хозрасчет. При этом должна произойти консолидация низовых звеньев между собой для достижения приемлемого уровня самоокупаемости объединенной единицы (консолидация может происходить как под управлением макрорегионального уровня, так и на принципах самоорганизации);

4) изменение системы бюджетирования предприятия, а также организация казначейского управления бюджетом и казначейского финансирования подразделений с учетом перехода низовых звеньев управления на внутренний хозрасчет.

Среди федеральных предприятий связи и телекоммуникаций особое место занимает ОАО «Ростелеком», который в силу реорганизации путем консолидации МРК группы компаний ОАО «Связьинвест», по-видимому, вновь вернулся в завершающую фазу этапа роста через директивное руководство (в целом вновь завершено построение вертикальной структуры с сохранением большого числа уровней управле-

ния, при этом нижним уровням не хватает информации, свободы и ресурса для быстрой реакции на изменение внешней среды).

Действующая организационная структура ОАО «Ростелеком» в общем виде представлена на рис. 1. Указанная структура имеет ряд особенностей, являющихся предпосылками для ее дальнейшего развития:

- помимо административной вертикали «Генеральная дирекция – макрорегиональный филиал – региональный филиал – районный узел связи» в операционных целях сохранены функциональные вертикали, ключевыми из которых являются вертикали коммерческой и технической служб. Эти вертикали в принципе действуют до районных узлов связи;

- налицо уникальное преимущество перед конкурентами, которое состоит в наличии развитой сети из районных узлов связи. При наличии адекватных организационных решений эти узлы естественным путем станут хорошо мотивированными квазиавтономными «производствами» по оптимальному развитию распределительной сети, «последней мили», услуг на «последней миле», прямых продаж на соответствующей территории;

- управленческий уровень регионального филиала на практике не имеет ресурса (инвестиционного, организационного, мотивационного и т. п.) для оказания влияния на положение дел в районных узлах связи и является, по сути, дорогостоящим представительством вышестоящих управляющих звеньев ОАО «Ростелеком» в данном регионе.

Целевая структура ОАО «Ростелеком» после применения к структуре на рис. 1 организационных решений 1 – 4 может выглядеть следующим образом (рис. 2).

В итоге ОАО «Ростелеком» в операционной деятельности делится на две части: «мультисетевую» и «мультисервисную», каждая из которых организационно представляет собой федеральный филиал, в структуре которого принципиально отсутствует региональный уровень управления. В зону ответственности «мультисетевой» части входит обеспечение работы опорной базовой сети, транспортных сетей и сетей коммутации, включая мультисервисные узлы доступа (MSAN). В зону ответственности «мультисервисной» части входят маркетинг, реклама, ценообразование, продажи и сервис, а также построение и эксплуатация распределительных сетей и «последней мили».

Соответственно структура управления «мультисервисного» филиала состоит из макрорегионального уровня и уровня районных узлов связи, обеспечивающего продажу услуг и клиентский сервис на локальной территории. Районные узлы связи содержат также подразделения, обеспечивающие развитие и техническое обслуживание средств доступа абонентов к услугам. «Мультисервисный» и «мультисетевой» филиалы взаимодействуют между собой на основе горизонтального хозрасчета, причем первый выступает в роли заказчика по отношению ко второму. Районные узлы связи осуществляют непосредственное взаимодействие с абонентами и конкурируют с другими операторами, обеспечивая в итоге интенсивное развитие сети доступа и клиентских услуг.

Базовые станции мобильной связи, а также мачты, башни и опоры (рис. 2) помещены в зону ответственности «мультисервисной» части, но без потери смысла могут находиться в зоне ответственности «мультисетевой» части.

«Дорожная карта» перехода ОАО «Ростелеком» к предложенной структуре может иметь следующий вид:

- а) организационное разделение генеральной дирекции ОАО «Ростелеком» на стратегическое и операционное направления с подчинением соответствующим вице-

президентам;

б) разработка и внедрение методики расчета рентабельности районных узлов связи как в целях определения объемов их финансовых перечислений на вышестоящий уровень, так и в целях возможной консолидации районных узлов до уровня безубыточности;

в) создание в генеральной дирекции ОАО «Ростелеком» казначейства с функциями внутреннего «банка» в целях организации исполнения бюджета и внутреннего краткосрочного и инвестиционного финансирования федеральных филиалов и районных узлов связи, открытия и ведения «расчетных счетов» районных узлов связи в казначействе;

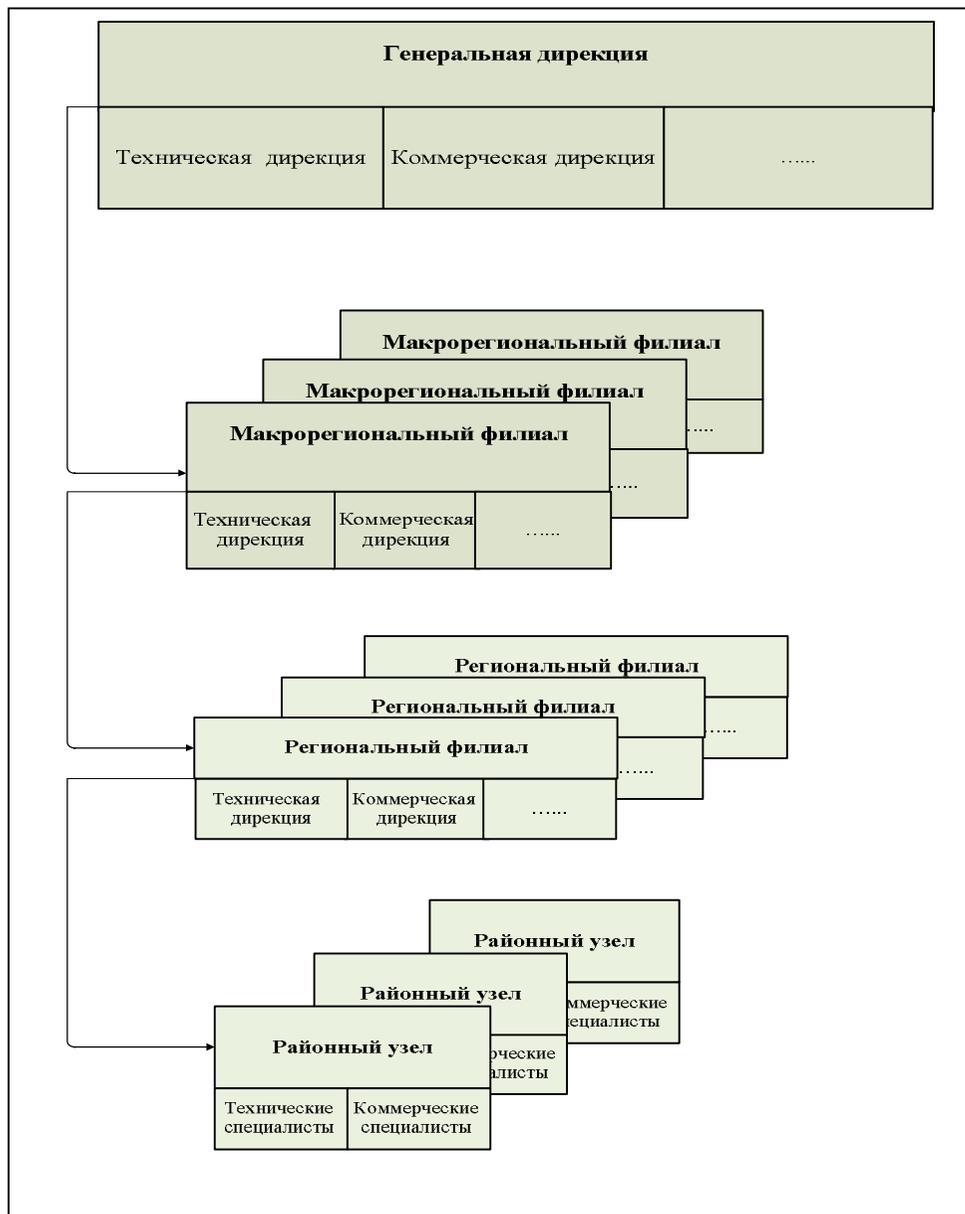


Рис. 1. Действующая организационная структура ОАО «Ростелеком»

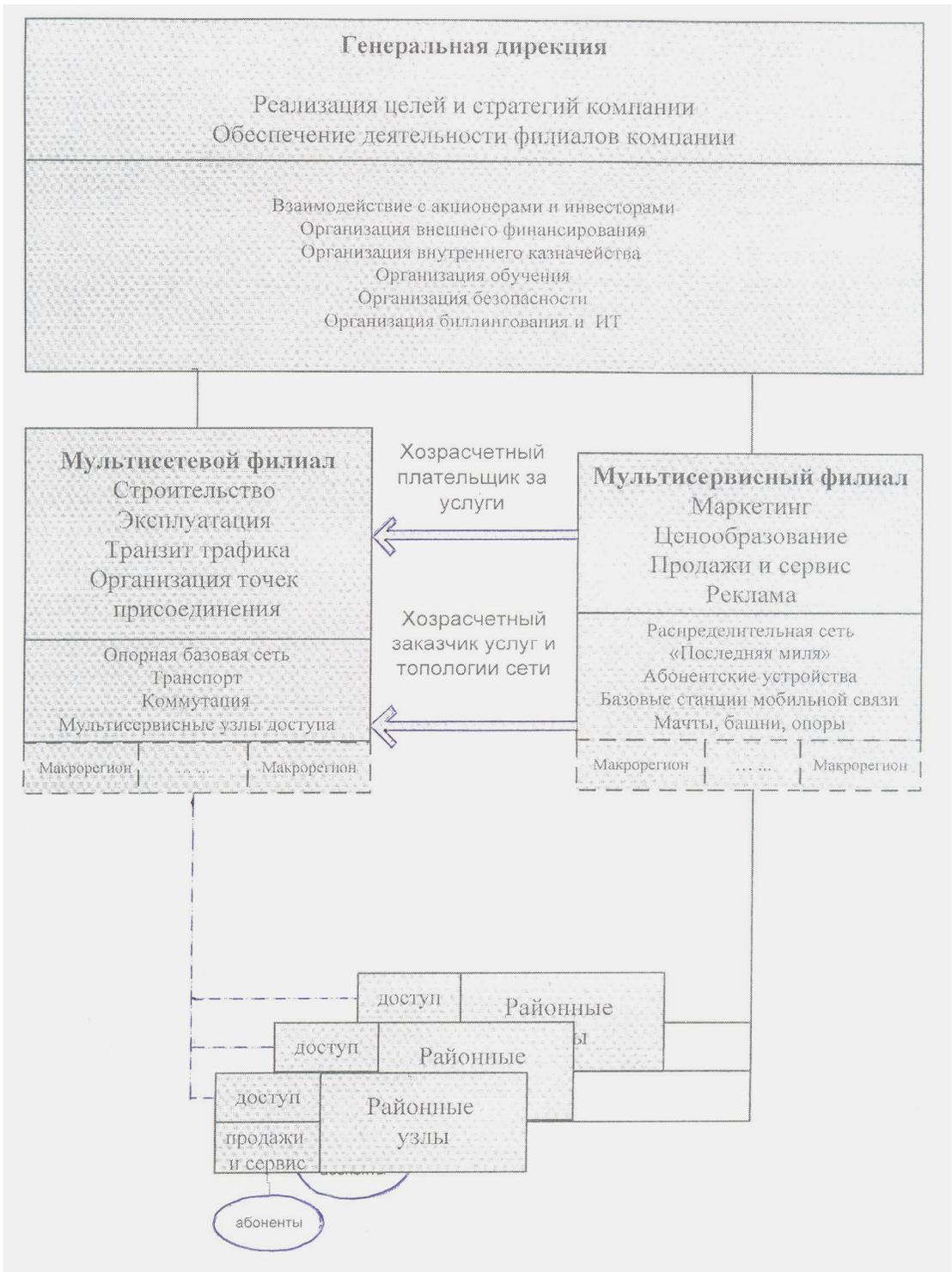


Рис. 2. Целевая структура ОАО «Ростелеком» после выполнения организационных преобразований

г) создание внутри операционного направления ОАО «Ростелеком» двух федеральных филиалов: мультисетевого и мультисервисного с наделением мультисер-

висного филиала функциями заказчика по отношению к мультисетевому филиалу;

д) ликвидация в структуре ОАО «Ростелеком» региональных филиалов с одновременным переподчинением существующих районных узлов связи мультисервисному федеральному филиалу и созданием на его базе региональных представительств ОАО «Ростелеком». При этом узел связи соответствующего областного центра приравнивается к обычному районному узлу связи данного региона, а директора ликвидированных филиалов становятся руководителями соответствующих региональных представительств;

е) перевод технического персонала ликвидируемых региональных филиалов в мультисетевую филиал, а коммерческого персонала – в мультисервисный с одновременным сокращением персонала ликвидируемого регионального управленческого звена.

При реализации «дорожной карты» пункты *a, б, в* выполняются одновременно и предшествуют пунктам *г, д, е*, которые также выполняются одновременно.

Итогом предлагаемого организационного развития в случае ОАО «Ростелеком» помимо прямого экономического эффекта от сокращения управленческой вертикали станет также повышение управляемости предприятием и, что немаловажно, будет сделан важный шаг к достижению социального согласия (солидарности) в коллективе предприятия. Все вышесказанное вместе взятое будет способствовать росту жизнеспособности предприятия в современном сложном и быстро меняющемся глобализированном мире.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Greiner L. Evolution and revolution as organization grow / Harvard Business Review. Juli-August. 1972. P. 37-46.
2. Гэлбрейт Дж. Новое индустриальное общество. – М.: АСТ; Транзиткнига; СПб.: Terra Fantastica, 2004. – С. 51-59.

Статья поступила в редакцию 5 октября 2012 г.

DEVELOPMENT OF ORGANIZATIONAL STRUCTURE OF THE VERTICALLY INTEGRATED TELECOMMUNICATIONS AGENCY AND TELECOMMUNICATIONS ON JSC ROSTELECOM EXAMPLE

A. Ya. Belobokov¹, B. Ya. Lichtcinder²

¹ ZAO «BENEFIT»
19, R. Lyuksemburg st., Ekaterinburg, 620000

² Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics
23, Lev Tolstoy st., Samara, 443010

Organizational structures of the vertically integrated telecommunication enterprises are considered. Expediency of reorganization of JSC Rostelecom, and creation of two federal branches is shown: «multinetwork» and «multiservice».

Keywords: *telecommunications agencies, management structure, federal branches, regional communication centers.*

*Andrey Ya. Belobokov (Ph.D. (Techn.))
Boris Ya. Lichtcinder (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ОПЕРАТИВНО-КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

М.А. Бражников, Е.Г. Сафронов

Самарский государственный технический университет
443 100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: qaz2201@yandex.ru

Предложена система показателей комплексной оценки оперативно-календарных планов производства: отклонение от равномерности использования ресурсов, коэффициент ритмичности, длительность одного оборота трудовых затрат, потребность в оборотных средствах. Сформулирован общий подход к анализу альтернативных вариантов календарного плана на основе принципов многокритериальной оптимизации.

Ключевые слова: *оперативно-календарный план, ритмичность производства, равномерность использования ресурсов, коэффициент ритмичности, длительность оборота трудовых затрат, потребность в оборотных средствах, векторная оптимизация.*

Эффективность машиностроительного производства – обеспечение ритмичности технологического процесса, сохранение запланированного уровня качества выпускаемых изделий, снижение их себестоимости, а следовательно, и повышение конкурентоспособности продукции – во многом predetermined содержанием методов внутризаводского планирования. И в первую очередь обеспечение нормального (запланированного) хода технологического процесса зависит от степени точности, качества и уровня обоснования календарных планов производства.

В целях оценки, мониторинга и анализа выполнения производственного плана необходимо использовать обобщающие показатели, отражающие уровень и динамику ритмичности производства [1, с. 128]. Для того чтобы установить связь оценки изменения ритмичности и эффективности производства, выполнено следующее экспериментальное исследование [2]. В качестве объекта исследования выбрана производственная программа участка узловой сборки одного из цехов машиностроительного объединения – номенклатура рассматриваемого участка (63 сборочные единицы). Путем изменения величины допустимого отклонения от равномерности по всем видам используемых ресурсов на основе разработанной экономико-математической модели [3] получен (при прочих равных условиях) ряд календарных планов одного и того же участка за один и тот же плановый период.

В процессе разработки календарных планов в качестве допустимых отклонений от равномерности использования ресурсов использованы величины, полученные в ходе экспериментальных исследований [2] и равные 10 %:

- объем сборочных работ на единицу длительности цикла;
- фонд времени по каждой группе взаимозаменяемых сборочных рабочих мест и по каждой механообрабатывающей стадии;
- объем выпуска продукции;
- величина связывания средств в незавершенном производстве.

Оценка полученных календарных планов сборочного участка выполнена с по-

Максим Алексеевич Бражников (к.э.н., доц.), доцент кафедры «Производственный менеджмент».

Евгений Геннадьевич Сафронов (к.э.н.), ст. преподаватель кафедры «Производственный менеджмент».

мощью следующих показателей:

- отклонения от равномерности (по каждому виду вовлекаемых в процесс производства ресурсов) запланированных объемов от объемов ритмичного выпуска;
- средняя длительность одного оборота трудовых затрат в производстве, отражающая динамику вовлечения оборотных средств в условиях реализации построенного календарного плана;
- коэффициенты ритмичности, обеспечивающие учет степени соответствия запланированных работ объему ритмичного выпуска;
- условная потребность в оборотных средствах, связанных в незавершенном производстве.

Отклонения от равномерности. По каждому виду используемых ресурсов отклонения от равномерности определены как отношение потребных (вовлекаемых в производственный процесс) ресурсов по каждому планово-учетному периоду к значению имеющихся ресурсов, характеризующих их пропорциональное (ритмичное) использование. Отклонения от равномерности, выраженные в процентах, позволяют на этапе построения календарного плана отслеживать возобновление процесса производства в разрезе каждого планово-учетного периода, отражая достаточно надежную и наглядную картину динамики фактического выполнения плана.

Использование относительно простых показателей отклонений от равномерности позволит обеспечить пропорциональность потребления различных видов ресурсов, на базе которых осуществлено построение календарных планов.

Рост величины допустимых отклонений от 4 до 22 % обуславливает снижение относительной величины нарушения ритмичности по всем видам ресурсов. Так, разработка календарного плана в условиях 10%-х отклонений приводит к максимальным пределам в разрезе первых двух декад. Предельные отклонения по величине незавершенного производства составили –13,77 % во второй декаде, по фондам времени взаимозаменяемого оборудования –10,90 и –11,70 %.

В последних декадах планового периода отклонения по видам ресурсов обеспечивают минимальные значения: в пределах от –3,77 до +2,77 %.

Оценка ритмичности. Коэффициент ритмичности рассчитывается как по каждой декаде в отдельности, так и кварталу в целом по формуле

$$R_k = \frac{\bar{T}_k}{T_k} + \min \left\{ \frac{T_k^\Pi - \bar{T}_k}{\sum_{k=1}^k T_k}, \frac{\sum_{k=1}^k (T_k - \bar{T}_k)}{\sum_{k=1}^k T_k} \right\}, \quad (1)$$

или

$$R_k = \frac{\sum_{k=1}^k T_k^\Pi}{\sum_{k=1}^k T_k} + \min \left\{ \frac{T_k^\Pi - \frac{\sum_{k=1}^k T_k}{k}}{\sum_{k=1}^k T_k}, \frac{\sum_{k=1}^k T_k - \frac{\sum_{k=1}^k T_k}{k}}{\sum_{k=1}^k T_k} \right\}, \quad (2)$$

где k – порядковый номер текущего (анализируемого) планово-учетного периода в плановом периоде;

T_k – средний плановый (ритмичный) объем выпуска за планово-учетный пери-

од, нормо-часов;

\bar{T}_k – планируемый (потребный) объем выпуска за планово-учетный период ($k = 1, 2 \dots k$) в пределах среднего планового объема, нормо-часов;

T_k^{Π} – объем выпуска за планово-учетный период (k), нормо-часов.

Первая составляющая $\frac{\sum_{k=1}^k T_k^{\Pi}}{\sum_{k=1}^k T_k}$ – коэффициент выполнения плана за каждый пла-

ново-учетный период – отражает процент соответствия планируемых работ объему ритмичного выпуска.

Второй показатель $\frac{T_k^{\Pi} - \frac{\sum_{k=1}^k T_k}{k}}{\sum_{k=1}^k T_k}$ отражает степень перегрузки плана в том или

ином интервале времени в тех случаях, когда требуется выполнить сверхнормативные работы в целях компенсации потерь ритмичности производства, возникших в предшествующих планово-учетных периодах. Наличие коэффициента перевыполнения плана и его величина напрямую зависят от значения коэффициента выполнения плана. Чем ниже коэффициент выполнения плана, тем в большей степени потребуются проведение дополнительных работ.

Третья часть выражения $\frac{\sum_{k=1}^k T_k - \frac{\sum_{k=1}^k T_k}{k}}{\sum_{k=1}^k T_k}$ ограничивает степень перевыполнения

плана (второй части формулы) посредством кумулятивного (нарастающего по отрезкам планового периода) учета невыполнения (предшествующих недогрузок) плана с первого по рассматриваемый планово-учетный периоды. Цель такого ограничения – нивелировать стремление к сверхнормативной загрузке (решить все проблемы одним махом с помощью незапланированных авральных работ) в случае возникновения потерь в предшествующих периодах и тем самым обеспечить рациональность использования ресурсов.

Систематический мониторинг ритмичности основан на сопоставлении плановых показателей с фактическими значениями в разрезе каждого планово-учетного периода с целью нейтрализации факторов неопределенности (невыходы производственных рабочих, обнаружение брака и т. п.).

Расчетные значения коэффициента ритмичности стимулируют выполнение плана на основе рационального использования оборудования, рабочих и производственных площадей, но не обязательно свидетельствуют об эффективном использовании оборотных средств.

Динамика коэффициента ритмичности соответствует изменению отклонений от равномерности ресурсов. Рост нарушений приводит к увеличению значения коэф-

фициента ритмичности с 0,913 (4 %) до 0,963 (17 %).

Длительность оборота трудозатрат. Средняя длительность одного оборота трудозатрат определена как отношение объема связывания средств в незавершенном производстве к объему выпуска сборочных единиц. Эта величина определяется с первой по рассматриваемую декаду. При этом для расчета величины связывания оборотных средств в незавершенном производстве используются длительности производственного цикла сборочных единиц, полученные в плане.

Связывание средств в незавершенном производстве и величина объема выпуска продукции в каждом планово-учетном периоде в трудовом выражении соответственно могут быть определены как

$$H = \sum_{j=1}^j \sum_{v=1}^v \frac{t_j n_{vj} T_{vj}^u}{2D}; \quad (3)$$

$$T = \sum_{j=1}^j \sum_{v=1}^v \frac{t_j n_{vj}}{D}, \quad (4)$$

где m – порядковый номер классификационной группы однородных партий предметов; j – порядковый номер рассматриваемой сборочной единицы; v – порядковый номер рассматриваемой партии предметов; D – количество планово-учетных периодов в плановом периоде; n_{vj} – нормативный размер партии (v) сборочной единицы (j); t_j – норма времени на сборку сборочной единицы (j), нормо-часов; T_{vj}^u – длительность производственного цикла или остаточная длительность цикла сборочной единицы (j) партии (v), планово-учетных периодов.

Изменение средней длительности одного оборота трудозатрат в производстве по декадам квартала характеризует степень стабильности оборотных средств в условиях построенного календарного плана. Средняя длительность цикла за квартал в целом определяется как средняя величина всех рассчитанных по декадам значений.

Среднеквартальная длительность одного оборота трудозатрат в производстве имеет тенденцию уменьшения с ростом нарушения равномерности. Это происходит за счет сокращения времени межоперационных перерывов. Партии сборочных единиц меньше пролеживают в ожидании их подачи на сборку последующей сборочной единицы, тем самым увеличивая скорость оборота оборотных средств, вложенных в незавершенное внутрицеховое производство.

Максимальные значения длительности оборота трудозатрат (2,76 и 2,77) обеспечиваются при низких величинах отклонений (4 и 6 % соответственно). При этом средняя длительность по декадам возрастает с 1,54 до 3,68 при 10 %. Дальнейший рост отклонений от равномерности стабилизирует среднеквартальные значения в пределах $2,71 \pm 0,01$ декад.

Использование такой системы показателей оборота трудозатрат (по каждому планово-учетному периоду) обеспечит строгую повторяемость производства и выпуска однородной продукции, что в результате стимулирует эффективное использование ресурсов.

Потребность в оборотных средствах. Условная потребность связывания оборотных средств в незавершенном производстве (в экономико-математической модели [3] – целевая функция) определяется по формуле

$$S_{vj} = \frac{\left[(C_j + C_j^M) \frac{T_{vj}^u}{2} + (k_{vj} - k) C_j \right] n_{vj}}{T_{vj}^u + k}, \quad (5)$$

где k – порядковый номер текущего планово-учетного периода в плановом периоде;

k_{vj} – крайний срок выпуска партии (v) предмета (j) – планово-учетный период;

C_j – производственная себестоимость сборочной единицы (j), руб.;

C_j^M – затраты на материалы по сборочной единице (j), руб.

Изменение значений условной потребности в оборотных средствах по вариантам непосредственно связано с величиной допустимого отклонения от равномерности использования ресурсов. Увеличение показателя условной потребности в оборотных средствах с 522450,36 руб. (4 %) до 727727,24 (22 %) обусловлено ростом нарушения равномерности. Вследствие снижения равномерности (роста величины допустимых отклонений) появляется возможность в ранних планово-учетных периодах квартала наращивать объем выпуска продукции. Увеличение объемов возможно за счет изготовления более трудоемких партий сборочных единиц или увеличения числа вовлекаемых в производство партий сборочных единиц. А это вызывает рост потребности в оборотных средствах, вложенных в межцеховое незавершенное производство, так как ранее изготовленные на данном участке части одного из изделий будут пролеживать (вследствие их раннего выпуска) в ожидании других узлов и частей этого же изделия, не прошедших сборку или механическую обработку.

Интегральная оценка. Интегральная оценка полученного календарного плана может быть получена на основе методов векторной оптимизации, во-первых, при расчете каждого результирующего показателя по декадам квартала (если это необходимо), а во-вторых, при оценке влияния каждого индивидуального показателя оценки на качество разработки календарного плана с целью выбора оптимального варианта.

Решение задачи оптимального выбора основано на нахождении максимального результата совокупной функции полезности (вектор функции) [4, 5]:

$$f^*(a_i) = (f_1(a_i), f_2(a_i) \dots f_j(a_i) \dots f_n(a_i)) \rightarrow \max, \quad (6)$$

где $f_j(a_i)$ – значение критерия оценки (j) по альтернативе (a_i).

В целях определения оптимального варианта в процессе принятия решений в условиях неопределенности в первую очередь необходимо привести к единой размерности возможные критерии оценки – провести нормализацию критериев. Предпринимательские цели (критерии) имеют различный масштаб и несопоставимые шкалы (единицы) измерения. Прежде чем приступить к решению многокритериальной задачи, их необходимо привести к одной и той же единице измерения (обычно используются безразмерные величины). Такой процесс приведения критериев в единый вид называется нормализацией.

Среди возможных подходов к оптимизации решения следует выделить следующие принципы оценки.

Метод *равномерной оптимальности* – лучший вариант обеспечивает максимум суммы отдельных значений каждой целевой функции:

$$f^*(a_i) = \sum_{j=1}^n f_j^*(a_i) \rightarrow \max. \quad (7)$$

Исходной посылкой принципа равномерной оптимальности является то, что все подлежащие оценке критерии имеют примерно одинаковое (равноценное) экономическое значение. Основной недостаток сводится к тому, что в некоторых случаях малые значения (низкая степень достижения цели) компенсируются высокими результатами, что в реальной практике приводит к «размыванию» и подмене целевых приоритетов компании.

Метод *справедливого компромисса* – оптимальный вариант определяется на основе максимального значения произведения анализируемых критериев:

$$f^*(a_i) = \prod_{j=1}^n f_j^*(a_i) \rightarrow \max. \quad (8)$$

Такой подход защищает разработанный план от подмены приоритетов, но может привести к потере отдельных планов, которые, несомненно, заслуживают внимания. Так, в проигрыше может оказаться такой вариант плана, который по всем критериям имеет самые высокие значения показателей и лишь по одному критерию – наихудший вариант.

Метод *свертывания критериев* – лучший вариант обеспечивает максимум суммы отдельных значений каждой целевой функции с учетом «веса» критерия, отражающего его значимость в составе оценочных показателей:

$$f^*(a_i) = \sum_{j=1}^n \alpha_j f_j^*(a_i) \rightarrow \max, \quad \sum_{j=1}^n \alpha_j = 1. \quad (9)$$

Основная проблема заключена в выведении достаточно точной экспертной оценки различных показателей в системе координат экономической деятельности предприятия.

Метод *главного критерия* – выбор основан на максимизации наиболее значимого критерия, остальные показатели представлены как ограничения:

$$f_j^* = f_j^*(a) \rightarrow \max, \quad f_j^*(a) \geq L_j, \quad (10)$$

где L_j – нижняя (верхняя) граница, соответствующая какому-либо предельному значению оцениваемого показателя.

В этом случае в качестве главного критерия оценки следует применить коэффициент ритмичности производства, используя прочие показатели как ограничения.

Метод *равномерного сжатия* – выбор альтернативы базируется на минимизации отклонений от наибольшего значения (идеальной точки):

$$f^*(a_i) = \max_j [f_j^* - f_j^*(a_i)] \rightarrow \min, \quad f_j^* = \max_i f_j^*(a_i). \quad (11)$$

Альтернативный подход основан на том, что анализируется (минимизируется) сумма полученных отклонений по каждому из вариантов.

Метод *ранжирования* – альтернативные варианты оцениваются по соответствию критерия некоему порядковому месту (рангу):

$$f^*(a_i) = \sum_{j=1}^n (f_j^* - f_j^*(a_i)) \rightarrow \min; \quad (12)$$

$$f^*(a_i) = \sum_{j=1}^n r_j(a_i) \rightarrow \max, \quad \text{если } r_j(a_i) = 1, \quad (13)$$

где $r_j(a_i)$ – ранг (место) критерия (j) по альтернативе (i).

Вывод. Таким образом, в качестве оценочных параметров качества разработки

календарных планов следует использовать совокупность показателей, отражающих уровень обеспечения ритмичности производственной системы:

– отклонения от равномерности (по каждому виду вовлекаемых в процесс производства ресурсов) запланированных объемов от объемов ритмичного выпуска (имеющихся ресурсов);

– средняя длительность одного оборота трудовых затрат в производстве, отражающая равномерность использования ресурсов в трудовом выражении;

– коэффициенты ритмичности по каждому отрезку горизонта планирования, учитывающие и ограничивающие степень «перегрузки» производственной системы и уровень невыполнения плана;

– условная потребность в оборотных средствах в незавершенном производстве, обеспечивающих стабильность размещения и распределения финансовых ресурсов в течение планового периода.

Итоговая оценка и разрешение «конфликта» отдельных показателей основана на принципах оптимизации управленческих решений.

Предлагаемая система оценочных показателей позволяет обеспечить комплексную оценку календарных планов как в процессе их разработки, так и на этапе выполнения производственной программы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Курляндчик Р.И. Обеспечение ритмичности машиностроительного производства. – Л.: Машиностроение, 1989. – 144 с.
2. Бражников М.А. Анализ влияния величины допустимых отклонений от равномерности на оценочные показатели календарных планов сборочного производства // Организатор производства. – 2002. – № 1. – С. 46-51.
3. Бражников М.А. Моделирование календарных планов сборочных процессов в условиях машиностроительного производства // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. – 2004. – № 26. – С. 165-173.
4. Царев В.В. Внутрифирменное планирование. – СПб.: Питер, 2002. – 496 с.
5. Кузин Б.И., Юрьев В.Н., Шахдинаров Г.М. Методы и модели управления фирмой. – СПб.: Питер, 2001. – 432 с.

Статья поступила в редакцию 1 октября 2012 г.

INTEGRATED ASSESSMENT OF THE MACHINE-BUILDING PRODUCTION OPERATIONAL CALENDAR PLAN

M. Brazhnikov, E. Safronov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The paper introduces several indices for the integrated operational and calendar production plan assessment: deviation from the resource management uniformity, rhythmicity coefficient, duration of one revolution of labor costs, need for operating assets. The paper represents the general approach to the analysis of alternative variants of calendar production plan on the basis of multi-objective optimization principles.

Keywords: *a day-to-day production planning, rhythmicity of the production, the use of resources uniformity, the coefficient of rhythmicity, duration of the revolution of labour expenditures, the need for circulating assets, vector optimization.*

*Maksim A. Brazhnikov (Ph.D. (Econ.)), Associate professor.
Evgeniy G. Safronov (Ph.D. (Econ.)), Senior Lecture.*

САМОНАСТРАИВАЮЩИЕСЯ АЛГОРИТМЫ УСТРАНЕНИЯ СТАТИЧЕСКИХ ОШИБОК В АВТОМАТИЧЕСКИХ ЛИНЕЙНЫХ И АВТОКОЛЕБАТЕЛЬНЫХ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМАХ СТАБИЛИЗАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В.Е. Вохрышев

Самарский государственный технический университет
443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Предложены и исследованы самонастраивающиеся алгоритмы управления, обеспечивающие устранение статических ошибок в линейных системах и симметричность автоколебаний относительно уставки в нелинейных автоколебательных системах при несимметричных ограничениях на управляющие воздействия и постоянно действующих возмущениях.

Ключевые слова: самонастраивающийся алгоритм, релейная система управления, статическая ошибка.

Качество работы систем автоматического управления в установившемся режиме работы оценивается по величине статической ошибки, равной в линейных системах разности между требуемым (уставкой) и действительным значениями регулируемой величины, а в автоколебательных нелинейных системах – величиной отклонения среднего значения автоколебаний регулируемой координаты от заданного значения. Наличие статических ошибок в автоматических системах обусловлено как свойствами объектов и систем их управления, так и возмущающими сигнальными и параметрическими воздействиями. Проблема выявления, оценки величины статических ошибок и способов их компенсации в теории автоматического управления объектами, математическое описание которых имеет приемлемую для практики достоверность, достаточно хорошо изучена [1, 2].

Однако в условиях существующей идеализации модели объекта или ее априорной неопределенности, которая всегда имеет место в реально работающих системах, использование известных методов устранения статических ошибок оказывается затруднительным.

В связи с этим задача поиска простых и практически эффективных законов и алгоритмов компенсации статических ошибок в условиях параметрической и структурной неопределенности характеристик объекта сохраняет свою актуальность.

Линейные системы. В линейных системах ошибка системы может быть найдена по выражению [1]

$$E(s) = \frac{x_0(s)}{1+W(s)} - \frac{\sum_{k=1}^m F_k(s) \cdot W_k(s)}{1+W(s)}, \quad (1)$$

где $x_0(s)$ и $F(s)$ – изображения требуемого значения регулируемой величины (уставки) и возмущающего воздействия соответственно;
 $W(s)$ – передаточная функция разомкнутой системы;

$F_k(s)$ и $W_k(s)$ – возмущение и соответствующая ему передаточная функция;
 $E(s) = x_0(s) - x(s)$ – изображение ошибки;
 $x(s)$ – изображение регулируемой координаты.

Применительно к выражению (1) передаточные функции разомкнутой системы и по возмущению дают возможность в символической или операторной форме записать дифференциальное уравнение, связывающее ошибку с входными воздействиями:

$$e(t) = \frac{x_0(t)}{1 + W(p)} - \frac{\sum_{k=1}^m f_k(t) \cdot W_k(p)}{1 + W(p)}, \quad (2)$$

где $p = \frac{d}{dt}$ – алгебраический оператор дифференцирования.

Статическая ошибка в системах стабилизации в соответствии с теоремой о предельном переходе при условии, что и возмущения $f_k(t) = f_{k0} = const$, будет иметь следующий вид:

$$e(t) = \left[\frac{x_0}{1 + W(p)} \right]_{p \rightarrow 0} - \left[\frac{\sum_{k=1}^m W_k(p) \cdot f_{k0}}{1 + W(p)} \right]_{p \rightarrow 0} = e_{cm1} + e_{cm2}. \quad (3)$$

Первое слагаемое выражения (3) представляет собой составляющую ошибки $e(t)$, определяемую задающим воздействием x_0 , которая может быть отличной от нуля в системах стабилизации без астатизма. В этом случае $W(p) = k$ представляет собой общий коэффициент усиления по разомкнутой цепи и первое слагаемое в выражении (3) может быть представлено в виде

$$e_{cm1}(t) = \frac{x_0}{1 + W(p)} = \frac{x_0}{1 + k}.$$

Эта составляющая ошибки может быть уменьшена путем увеличения коэффициента k и сведена к нулю при астатическом регулировании, когда $W(0) \rightarrow \infty$. Вторая составляющая никогда не обращается в нуль, если возмущающее воздействие приложено до интегрирующего звена.

Существуют способы, позволяющие устранить статическую ошибку без использования интегрирующих элементов. Достигается это введением неединичной обратной связи в замкнутых системах стабилизации либо масштабированием входного воздействия x_0 или выходной величины $x(t)$ [2].

Указанные методы компенсации ошибки оказываются, однако, малоприменимыми для практического использования в условиях неопределенности параметров объекта и среды, а также при действии параметрических и постоянно действующих сигнальных возмущений.

Полезное для практики решение проблемы может быть найдено путем применения законов и алгоритмов адаптивного управления.

В настоящей статье для устранения статической ошибки без использования интегрирующих звеньев в цепи основного контура управления предлагается и исследуется самонастраивающийся пропорциональный закон управления:

$$U = k_3 \cdot (k_1 \cdot x_0 + a(t) - x(t)) , \quad (4)$$

где

$$a(t) = k_2 \cdot \int_0^t (x_0 - x(t)) dt , \quad (5)$$

k_1, k_2 – постоянные коэффициенты;
 k_3 – коэффициент усиления регулятора;
 $x(t)$ – регулируемая координата.

На рис. 1 представлена структурная схема системы.

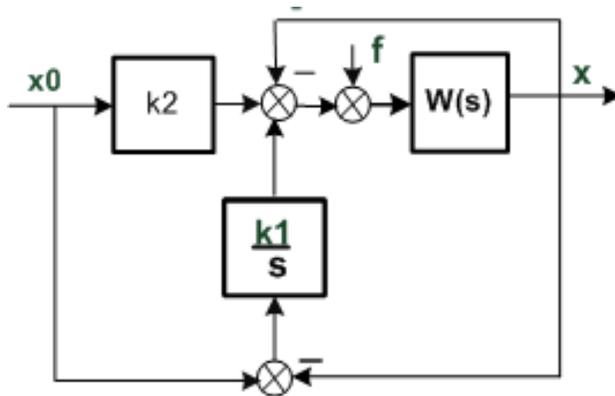


Рис. 1. Структурная схема системы

Как видно из соотношений (4) и (5), интегрирующее звено, включенное в контур самонастройки, выполняет автоматическое изменение задающего воздействия x_0 в функции ошибки и позволяет при соответствующем выборе коэффициентов k_2 и k_3 , обеспечивающих сходимость процессов в системе во всем диапазоне изменения параметров объекта и среды, устранять статические ошибки при действии как задающих, так и возмущающих параметрических и сигнальных воздействий без интегрирующих звеньев в прямой цепи управления.

Нелинейные автоколебательные системы. Большой класс нелинейных автоколебательных систем образуют релейные системы управления, обладающие простотой конструкции, алгоритмической и программной реализацией, высоким быстродействием, надежностью и высокой степенью инвариантности к вариациям параметров объекта [3]. Простейший релейный закон управления при симметричном управляющем воздействии имеет вид

$$U = B \cdot \text{sign}(M(x)) , \quad (6)$$

где $M(x)$ – функция переключения;

$$M(x) = x_0 - x(t) ;$$

sign – знаковая функция: $\text{sign} = 1$, если аргумент функции больше нуля, и $\text{sign} = -1$, если аргумент функции меньше или равен нулю;

B – величина управляющего воздействия.

При асимметричном управлении уравнение (4) обычно принимает вид

$$U = \begin{cases} B, & \text{при } M(x) > 0, \\ 0, & \text{при } M(x) \leq 0. \end{cases} \quad (7)$$

Внешние возмущающие воздействия и асимметричность управления вызывают смещение среднего значения автоколебаний относительно заданного, которое понимается как статическая ошибка. Процедура приближенного расчета величины смещения методом гармонического баланса для заданного объекта с управлением (6) и (7) приведена в работе [1]. Понятно, что в условиях неопределенности параметров объекта и среды устранение смещения автоколебаний должно осуществляться автоматически. Ниже предлагается и исследуется самонастраивающийся алгоритм, решающий эту задачу в автоколебательных системах стабилизации, путем автоматического масштабирования задающего воздействия в функции переключения:

$$M(x) = k_1 \cdot x_0 + a(t) - x(t), \quad (8)$$

$$a(t) = k_2 \cdot \int_0^t (x_0 - x_{cp}) dt. \quad (9)$$

Здесь все параметры в уравнениях (8) и (9), за исключением x_{cp} , имеют тот же смысл, что и в уравнениях (2) и (3), а x_{cp} – среднее значение амплитуды автоколебаний, которое в предлагаемом алгоритме определяется следующим образом:

$$x_{cp} = \frac{x_{max} + x_{min}}{2},$$

где x_{max} и x_{min} – экстремальные значения регулируемой координаты.

Алгоритмы управления (2) и (8) были исследованы методом цифрового моделирования в системах управления различными динамическими объектами в условиях действия как сигнальных, так и параметрических возмущений.

Рис. 2, полученный методом цифрового моделирования системы с управлением (2) и линейным объектом

$$W(s) = \frac{1.5}{(4.76 \cdot s + 1)(1.98 \cdot s + 1)(0.32 \cdot s + 1)},$$

иллюстрирует процесс автоматического изменения уставки, приводящий к устранению статической ошибки. Здесь же приведен процесс изменения координаты x при прочих равных условиях, но без масштабирования уставки.

Из рисунка видно, что в системе без самонастройки возникает статическая ошибка, устранить которую без интегрирующего звена в прямой цепи управления невозможно.

Рис. 3 иллюстрирует процессы в той же системе при постоянно действующем сигнальном возмущении $f = 0,1$ на входе объекта с релейным управлением (5), приводящем к стабилизации амплитуды автоколебаний и их симметричности относительно уставки. Здесь же приведен процесс изменения координаты $x(t)$ при прочих равных условиях, но без автоматического устранения смещения автоколебаний от носительного уставки x_0 , вызванного асимметричным управлением и возмущающим воздействием. На рис. 3 управление в системе без самонастройки условно не показано. Из рисунка видно, что без самонастройки управления возникает неустранимая статическая ошибка (смещение автоколебаний), равная разности между уставкой и средним значением автоколебаний.

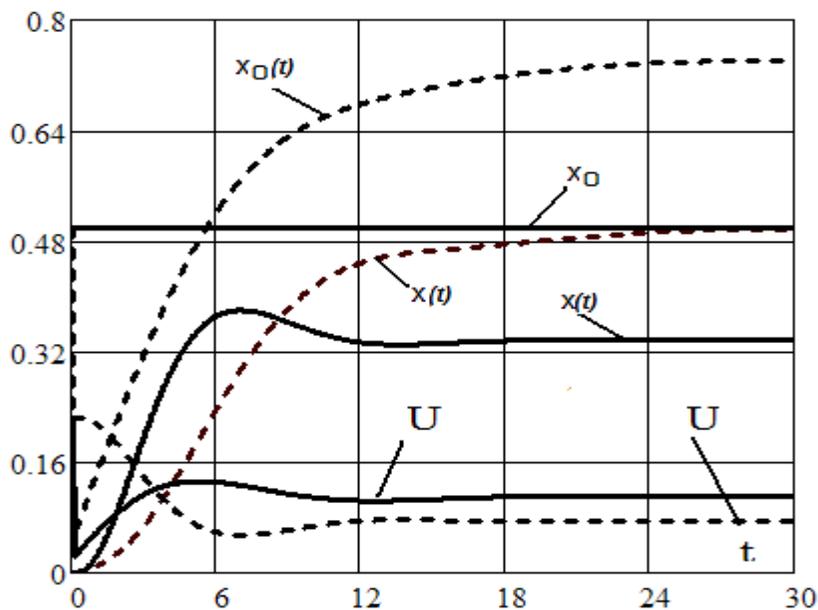


Рис. 2. Процессы в самонастраивающейся системе (пунктирные линии) и в системе без самонастройки (сплошные линии)

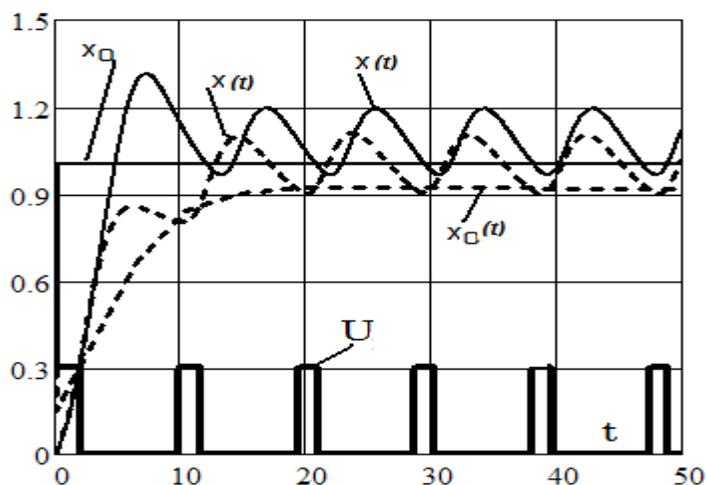


Рис. 3. Процессы в самонастраивающейся автоколебательной системе (пунктирные линии) и в системе без самонастройки (сплошные линии)

Выводы. Предложены и исследованы самонастраивающиеся алгоритмы управления в линейных и релейных автоколебательных системах, обеспечивающие в условиях неопределенности параметров объекта и среды устранение статических ошибок путем автоматического масштабирования величины задающего воздействия.

Работоспособность и эффективность алгоритмов подтверждена их исследованиями методом цифрового моделирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 768 с.
2. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов / С.Е. Душин, Н.С. Зотов, Д.Х. Имаев и др.; Под ред. В.Б. Яковлева. – М.: Высшая школа, 2003. – 567 с.
3. Фалдин Н.В. Релейные системы автоматического управления // Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – С. 573-636.

Статья поступила в редакцию 7 апреля 2012 г.

SELF-ADAPTING ALGORITHMS FOR ELIMINATION OF STATIC ERRORS IN AUTOMATIC LINEAR AND SELF-OSCILLATING NON-LINEAR SYSTEMS OF THE DYNAMIC OBJECTS STABILIZING

Valeriy E. Vokhryshev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The paper is the analysis of self-adapting control algorithms that provide the elimination of static errors in linear systems as well as symmetry of self-oscillations towards the demanded points in non-linear self-oscillating systems with nonsymmetric restrictions to control actions and with permanent perturbances.

Keywords: *self-adapting algorithm, relay direction system, static mistake.*

МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ БАЗЫ ЗНАНИЙ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ АНАЛИЗА СОСТОЯНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ РЕГИОНА

Н.Г. Губанов, Е.Ю. Кубрин

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: Nick_G_Gubanov@mail.ru

Предложена системная модель экспертизы развития региональной транспортной инфраструктуры, в частности строительных проектов развития, с целью их поддержки региональными властями. Данная модель позволяет описать взаимодействие регионального управления, рассматриваемый проект развития транспортной инфраструктуры и сложившиеся социально-экономические условия в регионе. Описывается формирование модели дорожно-транспортной сети на основе данных и знаний, накопленных в результате анализа дорожно-транспортной деятельности.

Ключевые слова: проекты развития дорожно-транспортной инфраструктуры, продукционная система, структурная таксономия.

Информационно-аналитические системы анализа состояния крупномасштабных инфраструктурных промышленных систем (ИАС КИПС) являются основным средством и инструментом системных исследований в области управления, анализа развития транспортной инфраструктуры. Транспортной системе (ТС) присущи свойства сложных систем, среди которых следует выделить: многоаспектность и неопределенность их поведения; иерархию, структурное подобие и избыточность основных элементов и подсистем ТС, связей между ними; многовариантность реализации функций управления на каждом из уровней ТС; территориальную распределенность компонент. Однако ТС как составляющая крупномасштабных инфраструктурных промышленных систем (КИПС) имеет ряд особенностей: комплексная, а не отраслевая поддержка промышленных объектов; инерционность, связанная с крайне высокими затратами на коренное изменение структуры; направленность на развитие, реконструкцию и модернизацию существующих схем.

Как показывает опыт исследований, при формировании системных моделей ТС целесообразно применение моделей и методов обработки знаний. В данной работе предлагается модель формирования базы знаний ТС, основанная на синтезе фреймовых и продукционных систем.

База данных содержит информацию о существующих элементах дорожно-транспортной сети и представлена фреймовой моделью. Структура базы данных представляет собой систему, состоящую из имен фреймов, имен слотов и заполнителей слотов.

Имена слотов могут являться одновременно именами фреймов более низкой иерархии, а имена фреймов соответственно могут быть именами слотов другого фрейма более высокой иерархии.

Николай Геннадьевич Губанов (к.т.н., доц.), декан факультета Автоматики и информационных технологий.

Егор Юрьевич Кубрин, аспирант.

Заполнителями слотов могут быть знания как декларативного, так и процедурного характера. Знания декларативного характера содержат факты, знания процедурного характера содержат правила формирования и использования знаний. При использовании в качестве заполнителей слотов только декларативных знаний необходимо использовать внешнюю управляющую структуру. Информацию об элементе дорожно-транспортной сети можно структурировать через описание его жизненного цикла. Таким образом, базу данных будем рассматривать как фрейм

$$D = (D_1, D_2, \dots, D_k) = \bigcup_{i=1}^k D_i,$$

где D_i – данные i -го элемента дорожно-транспортной сети:

$$D_i = \left\{ \left(\langle D_i^n \rangle, H \right), \left(\langle D_i^u \rangle, F \right), \left(\langle D_i^e \rangle, E \right) \right\} \quad (1)$$

где D_i^e – имя фрейма \langle элемент дорожно-транспортной сети на этапе проектирования

D_i^u – имя фрейма \langle элемент дорожно-транспортной сети на этапе строительства

D_i^e – имя фрейма \langle элемент дорожно-транспортной сети на этапе эксплуатации

$\langle H \rangle$ – имя слота = \langle параметры элемента дорожно-транспортной сети на этапе проектирования

$\langle F \rangle$ – имя слота = \langle параметры элемента дорожно-транспортной сети на этапе строительства

$\langle E \rangle$ – имя слота = \langle параметры элемента дорожно-транспортной сети на этапе эксплуатации

Рассмотрим более подробно эти массивы:

$$H = \{H_1, H_2, \dots, H_l\} = \bigcup_{j=1}^l H_j$$

$$H_j = \bigcup_{i=1}^u \left\{ \left(\langle hl_{ij} \rangle, hl_{ij} \right), \left(\langle ht_{ij} \rangle, ht_{ij} \right), \left(\langle hm_{ij} \rangle, hm_{ij} \right) \right\}, \quad (2)$$

где H_j – имя слота $\langle j$ -ая характеристика этапа проектирования элемента дорожно-транспортной сети

$\langle hl_{ij} \rangle$ – имя слота $\langle i$ -ая стоимостная характеристика

$\langle ht_{ij} \rangle$ – имя слота \langle длительность j -ой характеристики i -го расхода на проектирование

$\langle hm_{ij} \rangle$ – имя слота \langle начало j -ой характеристики i -го расхода с момента старта проектирования элемента дорожно-транспортной сети

$$F = \{F_1, F_2, \dots, F_l\} = \bigcup_{j=1}^l F_j$$

$$F_j = \bigcup_{i=1}^u \{ (\langle fl_{ij} \rangle, fl_{ij}), (\langle ft_{ij} \rangle, ft_{ij}), (\langle fm_{ij} \rangle, fm_{ij}) \} \quad (3)$$

где F – имя слота $\langle j$ -ая характеристика этапа строительства элемента дорожно-транспортной сети);

fl – имя слота $\langle i$ -ая стоимостная характеристика);

ft_{ij} – имя слота \langle длительность j -ой характеристики i -го расхода на строительство);

fm_{ij} – имя слота \langle начало j -ой характеристики i -го расхода с момента начала строительства элемента дорожно-транспортной сети).

$$E = \{E_1, E_2, \dots, E_l\} = \bigcup_{j=1}^l E_j$$

$$E = \{ (\langle el \rangle, el), (\langle et \rangle, et), (\langle em \rangle, em) \}, \quad (4)$$

где E_j – имя слота $\langle j$ -ая характеристика этапа строительства элемента дорожно-транспортной сети);

$\langle el \rangle$ – имя слота $\langle i$ -ая стоимостная характеристика);

$\langle et \rangle$ – имя слота \langle длительность j -ой характеристики i -го расхода на строительство);

$\langle em \rangle$ – имя слота \langle начало j -ой характеристики i -го расхода с момента начала эксплуатации элемента дорожно-транспортной сети).

Базу знаний будем рассматривать как фрейм

$$Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_g) = \bigcup_{i=1}^g Z_i \quad (5)$$

где Z_i – знания i -го элемента дорожно-транспортной сети:

$$Z_i = \{ (\langle Z_i^n \rangle, Y), (\langle Z_i^u \rangle, T), (\langle Z_i^o \rangle, J) \}, \quad (6)$$

где Z_i^o – имя фрейма \langle знания элемента дорожно-транспортной сети на этапе проектирования);

Z_i^u – имя фрейма \langle знания элемента дорожно-транспортной сети на этапе строительства);

Z_i^n – имя фрейма \langle знания элемента дорожно-транспортной сети на этапе эксплуатации);

$\langle Y \rangle$ – имя слота = \langle параметры элемента дорожно-транспортной сети на этапе проектирования);

$\langle T \rangle$ – имя слота = \langle параметры элемента дорожно-транспортной сети на этапе строительства);

$\langle J \rangle$ – имя слота = \langle параметры элемента дорожно-транспортной сети на этапе эксплуатации).

Такое наполнение фреймовой модели позволяет говорить об элементе дорожно-транспортной сети как о структурном объекте.

Базу правил P можно представить

$$P = (P_z, P_m, P_o, P_f),$$

где P_z – правила формирования базы знаний элементов дорожно-транспортной сети;
 P_u – правила формирования модели элемента дорожно-транспортной сети;
 P_k – правила комплексной оценки элемента дорожно-транспортной сети;
 P_w – правила формирования схемы финансирования дорожно-транспортной сети.

Рассмотрим более подробно каждую систему продукций

$$P_z = \langle D, Z, R_z, O_z \rangle,$$

где D – фрейм: множество параметров, освоенных ИП; Z – фрейм: знания ИП; R_z – множество продукций выявления знания Z с помощью данных D :

$$R_z = \{R_z^n, R_z^u, R_z^3\},$$

где R_z^n – продукция ⟨Правило формирования знаний элемента дорожно-транспортной сети на этапе проектирования⟩:

$$R_z^n; D^n \cup Z^n \exists H_j \cup O_z \rightarrow Z_j^n; j = j + 1, 1 \leq j \leq l,$$

где D^n определяется в (1), Z_j^n определяется в (6), H_j определяется в (2);

R_z^u – продукция = ⟨Правило формирования знаний элемента дорожно-транспортной сети на этапе строительства⟩:

$$R_z^u; D^u \cup Z^u \exists F_j \cup O_z \rightarrow Z_j^u; j = j + 1, 1 \leq j \leq l,$$

где D определяется в (1), Z_j^u определяется в (6), F_j определяется в (3);

R_z^3 – продукция ⟨Правило формирования знаний элемента дорожно-транспортной сети на этапе эксплуатации⟩:

$$R_z^3; D^3 \cup Z^3 \exists E_j \cup O_z \rightarrow Z_j^3; j = j + 1, 1 \leq j \leq l,$$

где D^3 определяется в (1), Z_j^3 определяется в (6), E_j определяется в (4), O_z – процедура формирования знаний элемента дорожно-транспортной сети.

$$P_m = \langle Z, M, R_m, O_m \rangle,$$

где Z – фрейм: знания элемента дорожно-транспортной сети; M – фрейм: модель элемента дорожно-транспортной сети; R_m – множество продукций построения модели элемента дорожно-транспортной сети с помощью знаний Z :

$$R_m; Z \cup M_j \exists Z_j \cup O_m \rightarrow m_j; j = j + 1, 1 \leq j \leq l,$$

где Z определяется в (5), Z_j определяется в (4), O_m – процедура формирования модели элемента дорожно-транспортной сети.

$$P_o = \langle M, Q, R_o, O_o \rangle,$$

где M – фрейм: модель элемента дорожно-транспортной сети; Q – фрейм: последствия эксплуатации элемента дорожно-транспортной сети; R_o – множество продукций комплексной оценки модели элемента дорожно-транспортной сети;

$$R_o = \{R_o^{o3}, R_o^{o9}, R_o^{k9}\},$$

где R_o^{o3} – продукция ⟨Правило формирования показателя общественной значимости дорожно-транспортной сети⟩;

$$R_o^{o3}; M_j \cup Q \exists m_j \cup O_o^{o3} \rightarrow q_j^{o3} \quad j = j + 1, 1 \leq j \leq l,$$

где $M_j, Q, q_j^{o3}, R_o^{o3}$ – продукция ⟨Правило формирования показателя общественной эффективности дорожно-транспортной сети⟩;

$$R_o^{o9}; M_j \cup Q \exists m_j \cup O_o^{o9} \rightarrow q_j^{o9} \quad j = j + 1, 1 \leq j \leq l,$$

где Q, q_j^{o9}, R_o^{k9} – продукция ⟨Правило формирования показателя коммерческой эффективности дорожно-транспортной сети⟩;

$$R_o^{k9}; M_j \cup Q \exists m_j \cup O_o^{k9} \rightarrow q_j^{k9} \quad j = j + 1, 1 \leq j \leq l,$$

где q_j^{k9} – показатели коммерческой эффективности;

$$O_o = (O_o^{o3}, O_o^{o9}, O_o^{k9}),$$

где O_o^{o3} – процедура формирования общественной значимости дорожно-транспортной сети;

O_o^{o9} – процедура формирования параметров общественной эффективности дорожно-транспортной сети;

O_o^{k9} – процедура формирования параметров коммерческой эффективности дорожно-транспортной сети.

$$P_f = \langle Q, N, R_f, O_f \rangle,$$

где Q – фрейм: последствия элемента дорожно-транспортной сети; N – фрейм: схема финансирования дорожно-транспортной сети; R_f – продукция формирования схемы финансирования дорожно-транспортной сети:

$$R_f; Q \cup N \exists Q_j \cup O_f \rightarrow N; \quad j = j + 1, 1 \leq j \leq l,$$

где O_f – процедура формирования схемы финансирования элемента дорожно-транспортной сети.

Предложенные методы многоуровневого формального представления, распознавания и обобщения фрагментов транспортной сети позволили сформировать базу знаний, включающую в себя несколько десятков классов элементов транспортной сети.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Батищев В.И., Мелентьев В.С. Аппроксимационные методы и системы промышленных измерений, контроля, испытаний, диагностики. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 393 с.
2. Батищев В.И., Губанов Н.Г. Методология оперативной реструктуризации информационных систем анализа состояния сложных технических объектов // Проблемы управления и модели-

рования в сложных системах: Тр. IX Междунар. конф. – Самара: СНЦ РАН, 2008. – С. 187-193.

3. *Батищев В.И., Губанов Н.Г.* Категорное представление сложных технических объектов в индуктивных системах логического вывода // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: Тр. IX Междунар. конф. – Самара: СНЦ РАН, 2008. – С. 185-191.
4. *Загоруйко Н.Г.* Прикладные методы анализа данных знаний. – Новосибирск: Изд-во Ин-та математики, 1999. – 270 с.

Статья поступила в редакцию 5 сентября 2012 г.

METHODS OF FORMATION OF KNOWLEDGE IN INFORMATION SYSTEMS ANALYSIS OF THE TRANSPORT INFRASTRUCTURE OF THE REGION

N.G. Gubanov, E.Y. Kubrin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeiskaya st., Samara, 443100

Proposed a system model of expertise development of regional transport infrastructure, in particular the construction of development projects, with a view to supporting the regional authorities. This model allows us to describe the interaction of regional governance, the project under consideration of transport infrastructure and the prevailing socio - economic conditions in the region. Describes the formation of the model of road transport network based on data and knowledge gained from the analysis of road transport activities.

Keywords: *development projects of road transport infrastructure, production system, structural taxonomy.*

*Nikolay G. Gubanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Egor Y. Kubrin, graduate student.*

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ В ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НА ОСНОВЕ МОДАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ*

А.Н. Дилигенская

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: adiligenskaya@mail.ru

Рассматривается задача идентификации пространственно-временной функции внутреннего тепловыделения в обратной задаче теплопроводности, представленной на основе модального описания в виде разложения в ряд по ортогональной системе собственных функций, коэффициентами которого являются временные моды. Поиск искомого управления сводится к независимой идентификации учитываемых мод, линейная комбинация которых обеспечивает аппроксимацию заданного температурного состояния.

Ключевые слова: обратная задача теплопроводности, пространственно-временное управление по мощности внутреннего тепловыделения, разложение функций в бесконечный ряд, ортогональная система собственных функций краевой задачи.

Введение. Методология решения обратных задач теплопроводности наряду с использованием экспериментальных методов исследования теплофизических процессов все чаще применяет средства математического моделирования и идентификации, позволяющие получить максимально полную информацию о рассматриваемых процессах, определить теплофизические и геометрические характеристики объекта, идентифицировать начальные и граничные условия, уточнить математическую модель объекта по косвенным их проявлениям [1].

Содержательная постановка задачи восстановления ненаблюдаемого пространственно-временного воздействия, определяемого конструктивными, технологическими и теплофизическими параметрами объекта, сводится к поиску таких управляющих воздействий, принадлежащих допустимому классу функций, которые обеспечивают при некотором начальном состоянии получение заданных экспериментальных температурных зависимостей для всех контролируемых точек в пределах рассматриваемого фиксированного временного интервала с допустимыми значениями качественных показателей [2].

Использование приближенного описания объектов с распределенными параметрами (ОРП) в виде многосвязной сосредоточенной системы и решение задач идентификации с применением теории систем с сосредоточенными параметрами может привести к потере качественных свойств, присущих пространственно распределенному управлению и функции состояния ОРП.

При необходимости восстановления распределенного воздействия во всей пространственной области его определения принципиальные особенности ОРП проявляются в полной мере, и использовать методы исследования систем с сосредоточен-

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00277).

ными параметрами зачастую не удается.

Наиболее общие и универсальные методики идентификации процессов теплообмена основаны на процедуре итерационной регуляризации сформулированных некорректных обратных задач теплопроводности [2], применение которой увеличивает сложность задачи при обеспечении допустимой погрешности аппроксимации точного решения.

Некорректные задачи теплопроводности можно решать без применения методов регуляризации, приводя их к условно-корректным задачам. Такая постановка может быть получена при разложении экспериментальных функций в бесконечные ряды, и последующее использование при практических расчетах аппроксимации в виде усеченного ряда приводит к решению систем алгебраических уравнений.

В статье для сохранения особенностей распределенности управляющего воздействия по пространственной и временной координатам предлагается использовать аналитическое решение обратной задачи теплопроводности при применении приближенного способа модального описания функции состояния ОРП и управляющего воздействия в форме конечного ряда по ортогональной системе функций пространственных координат с временными модами в роли его коэффициентов [3, 4, 5].

Постановка обратной задачи теплопроводности. Рассматривается модель нестационарного процесса теплопроводности с внутренним тепловыделением, заданная линейным одномерным неоднородным уравнением Фурье в относительных единицах при краевых условиях третьего рода:

$$\frac{\partial \theta(x, \varphi)}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 \theta(x, \varphi)}{\partial x^2} + F(x, \varphi), \quad 0 < x < 1, \quad 0 < \varphi \leq \varphi^0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \theta(1, \varphi)}{\partial x} + Bi\theta(1, \varphi) = 0, \quad \frac{\partial \theta(0, \varphi)}{\partial x} = 0, \quad \varphi \in [0, \varphi^0]; \quad \theta(x, 0) = 0, \quad x \in [0, 1]. \quad (2)$$

Здесь $\theta(x, \varphi)$ – температурное поле, зависящее от безразмерного времени (число Фурье) φ и пространственной координаты $x \in [0, 1]$; Bi – безразмерный критерий Био, определяющий уровень тепловых потерь с поверхности нагреваемого тела; $F(x, \varphi)$ – пространственно-временное управление по мощности внутреннего тепловыделения, подлежащее определению.

Полагается, что функция состояния объекта $\theta(x, \varphi)$ оценивается с некоторой точностью с помощью конечного числа N наблюдающих устройств по области изменения пространственной координаты $x \in [0, 1]$. В результате получены температурные зависимости $\theta_i^*(\varphi) = \theta(x_i^*, \varphi)$ в некоторых фиксированных точках $x_i^*, i = \overline{1, N}$.

Требуется восстановить пространственно-временное воздействие $F(x, \varphi)$, подчиненное ограничению

$$F(x, \varphi) \in V, \quad \varphi > 0; \quad x \in [0, 1] \quad (3)$$

принадлежности заданному множеству V соответствующих управляющих воздействий, минимизирующее отклонение от заданных зависимостей $\theta_i^*(\varphi)$ точного ре-

шения $\theta(x_i^*, \varphi)$ краевой задачи (1), (2), соответствующего искомым функциям $F^*(x, \varphi)$.

Решение обратной задачи теплопроводности. Задачу идентификации будем рассматривать как поиск управляющего воздействия $F(x, \varphi)$, при использовании которого результирующая пространственно распределенная функция $\theta(x, \varphi)$ аппроксимирует конечное число N экспериментальных температурных зависимостей $\theta(x_i^*, \varphi)$. При этом получение полной информации о состоянии бесконечномерного ОРП в принципе невозможно и результат измерения совокупности N зависимостей температур $\theta^*(\varphi) = \{\theta(x_i^*, \varphi)\} = [\theta(x_1^*, \varphi) \ \theta(x_2^*, \varphi) \ \dots \ \theta(x_N^*, \varphi)]^T$ всегда отличается от истинного значения $\theta(x, \varphi)$.

Для поиска $F(x, \varphi)$ представим функцию $\theta(x, \varphi)$ в виде ее разложения в бесконечный сходящийся в среднем [5] ряд по полной ортогональной системе собственных функций $\{\phi_n(\mu_n, x)\} = \{\cos(\mu_n x)\}$ краевой задачи (задачи Штурма – Луивилля). На основе использования метода разделения переменных каждый член полученного ряда представляет собой произведение двух функций одной переменной – времени или пространственной координаты:

$$\theta(x, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi) \phi_n(\mu_n, x). \quad (4)$$

При известных собственных числах μ_n и собственных функциях $\phi_n(\mu_n, x)$, определяемых лишь внутренней структурой объекта, температура $\theta(x, \varphi)$ задается коэффициентами ряда Фурье $\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)$, для нахождения которых можно использовать экспериментальные значения $\theta_i^*(\varphi)$.

Для этого составляется система независимых алгебраических векторных уравнений, аппроксимирующих экспериментальные температурные зависимости $\theta_i^*(\varphi)$ в контролируемых точках $x_i^*, i = \overline{1, N}$ в каждый момент времени $\varphi = \{\varphi_j\}, j = \overline{1, k}$ регистрации экспериментальных данных относительно неизвестных временных мод $\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)$. Максимальное число мод $\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)$, которые могут быть учтены при приближенном описании $\theta(x_i^*, \varphi)$ в виде усеченного ряда, определяется количеством линейно независимых строк системы уравнений и, соответственно, равно числу точек контроля N

$$\theta_i^*(\varphi) \approx \sum_{n=1}^N \bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi) \phi_n(\mu_n, x_i^*), \quad i = \overline{1, N}. \quad (5)$$

Ограничиваясь рассмотрением N числа составляющих ряда, полагая при этом совпадение измеренных данных с их вычисленными значениями, подставим $\theta_i^*(\varphi)$ в математическую модель объекта и запишем систему (5) в матричном виде

$$\theta^*(\varphi) = \Phi(\mu, x^*) \times \bar{\theta}(\varphi), \quad (6)$$

где строки матрицы $\Phi(\mu, x^*) = \|\phi_n(\mu_n, x_i^*)\|$ содержат значения всех $n = \overline{1, N}$ собственных функций объекта для каждой фиксированной точки x_i^* , а элементы ее столбцов рассчитаны для всех точек наблюдения x_i^* , $i = \overline{1, N}$ при зафиксированном номере n собственной функции; вектор-столбец $\bar{\theta}(\varphi)$ содержит значения временных мод $\bar{\theta}(\varphi) = \{\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)\} = \|\bar{\theta}_1(\mu_1, \varphi) \quad \bar{\theta}_2(\mu_2, \varphi) \quad \dots \quad \bar{\theta}_N(\mu_N, \varphi)\|^T$.

Определение значений любого конечного числа N временных мод $\bar{\theta}(\varphi)$ по приближенной модели ОРП (6) возможно, если объект обладает свойством наблюдаемости, для чего достаточно, чтобы пространственные координаты точек наблюдения x_i^* не являлись нулями ни одной из собственных функций краевой задачи $\phi_n(\mu_n, x)$ [6].

На основе системы уравнений (6) с помощью метода наименьших квадратов рассчитываются значения N временных мод $\bar{\theta}(\varphi) = \{\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)\}$ в каждый из фиксированных моментов времени φ_j :

$$\bar{\theta}(\varphi) = \Phi(\mu, x^*)^{-1} \times \theta^*(\varphi). \quad (7)$$

Пространственно-временное управление $u(x, \varphi) = F(x, \varphi)$ также представляется в виде разложения в ряд по собственным функциям

$$u(x, \varphi) = \sum_{n=1}^{\infty} \bar{u}_n(\mu_n, \varphi) \phi_n(\mu_n, x), \quad (8)$$

и для его поиска используется модальное описание параболического объекта (1), (2) в виде системы независимых дифференциальных уравнений первого порядка относительно N учитываемых мод $\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)$

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)}{d\varphi} &= -\mu_n^2 \bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi) + \bar{u}_n(\mu_n, \varphi), \quad n = \overline{1, N}; \\ \bar{\theta}_n(\mu_n, 0) &= \bar{\theta}_0(\mu_n) = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

с автономными управлениями $\bar{u}_n(\mu_n, \varphi)$ по модам разложения $u(x, \varphi)$.

Т.о., система (9) предоставляет возможность построения N не связанных друг с другом контуров восстановления отдельных мод распределенного управляющего воздействия

$$\bar{u}_n(\mu_n, \varphi) = \mu_n^2 \bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi) + \frac{d\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)}{d\varphi}, \quad n = \overline{1, N}. \quad (10)$$

Необходимые для этого значения производных $\frac{d\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi_j)}{d\varphi}$ могут быть определены разными способами, например аппроксимацией конечными разностями для всех моментов времени φ_j , $j = \overline{1, k}$

$$\frac{d\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi_j)}{d\varphi} \approx \frac{\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi_{j+1}) - \bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi_j)}{\varphi_{j+1} - \varphi_j}. \quad (11)$$

Другой способ приближенного вычисления $\bar{u}_n(\mu_n, \varphi)$ при использовании аналоговых моделей состоит в моделировании соотношения

$$\bar{u}_n(\mu_n, \varphi) \approx \mu_n^2 \left(\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi) + \frac{1}{T_n} \frac{d\bar{\theta}_n(\mu_n, \varphi)}{d\varphi} \right), \quad n = \overline{1, N} \quad (12)$$

на основе следующей схемы (рис. 1) при $K \gg 1$ и $T_n = \frac{1}{\mu_n^2}$.

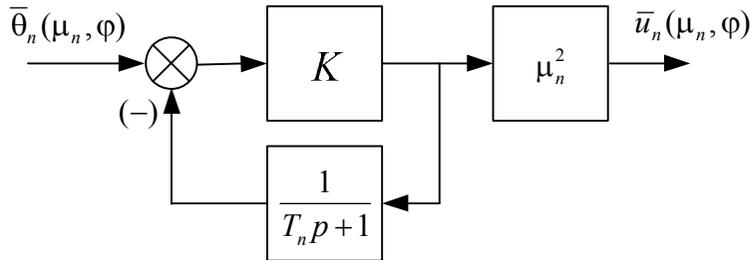


Рис. 1. Структурная схема моделирования временных мод пространственно-временного управляющего воздействия

Искомое управление $u(x, \varphi)$ восстанавливается в форме суммы N слагаемых ряда (8)

$$u(x, \varphi) \approx \sum_{n=1}^N \bar{u}_n(\mu_n, \varphi) \phi_n(\mu_n, x). \quad (13)$$

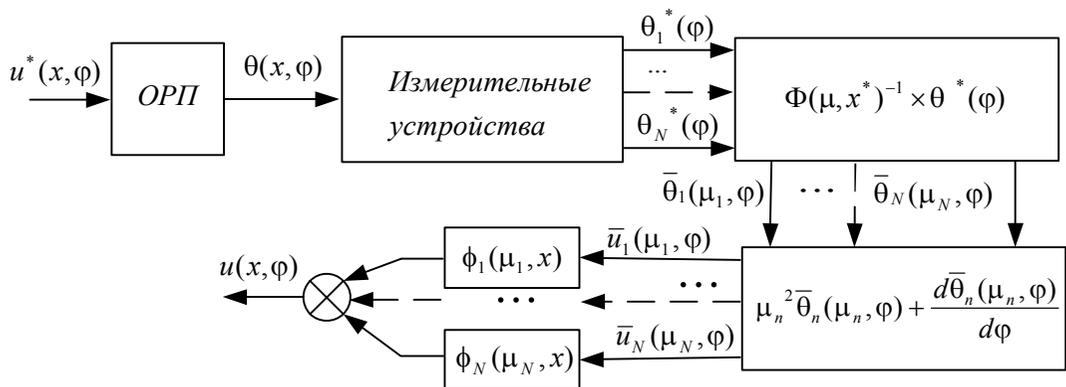


Рис. 2. Структура системы идентификации пространственно-временного управляющего воздействия параболического ОРП

Система идентификации пространственно распределенного воздействия в виде совокупности несвязанных контуров идентификации учитываемых мод управляемой величины по предварительно рассчитанным коэффициентам разложения экспери-

ментальных температурных зависимостей в ряд по собственным функциям имеет следующий вид (рис. 2).

Пример. В качестве примера рассматривалась обратная задача теплообмена при пространственно распределенном управляющем воздействии $F(x, \varphi)$ в виде произведения двух функций одной переменной

$$F(x, \varphi) = \Psi(x)\upsilon(\varphi). \quad (14)$$

Функция изменения по пространственной координате задана характерным для индукционного нагрева законом $\Psi(x) = \frac{ch(\sqrt{2}\zeta x) - \cos(\sqrt{2}\zeta x)}{sh(\sqrt{2}\zeta) - \sin(\sqrt{2}\zeta)} \sqrt{2}\zeta$, где ζ – параметр, зависящий от глубины проникновения тока в металл, а функция изменения $\upsilon(\varphi)$ во времени имеет синусоидальный характер $\upsilon(\varphi) = \sin \frac{\pi\varphi}{\varphi^0}$ $\varphi \in [0, \varphi^0]$.

Проведенные вычисления показывают, что наибольшие отклонения расчетного управления $F(x, \varphi) = u(x, \varphi) = \sum_{n=1}^N \bar{u}_n(\mu_n, \varphi) \phi_n(\mu_n, x)$ от его истинного значения $F^*(x, \varphi)$ возникают в граничных точках $x = 0 \cup 1$, а также во внутренних точках экстремумов, число которых по пространственной координате напрямую определяется числом учитываемых мод и равно $N - 1$.

Не учтенные системой идентификации моды $\bar{u}_n(\mu_n, \varphi)$, $n = \overline{N+1, \infty}$ управляющего воздействия дают некомпенсируемое отклонение полученного решения от истинного значения, определяя тем самым качество восстановления $F(x, \varphi)$.

С увеличением числа точек регистрации экспериментальных температурных кривых, а следовательно, и числа учитываемых мод N наблюдается тенденция улучшения качества аппроксимации $F(x, \varphi)$: абсолютные отклонения расчетных температур от истинных значений и абсолютная среднеквадратичная ошибка аппроксимации уменьшаются (рис. 3, а).

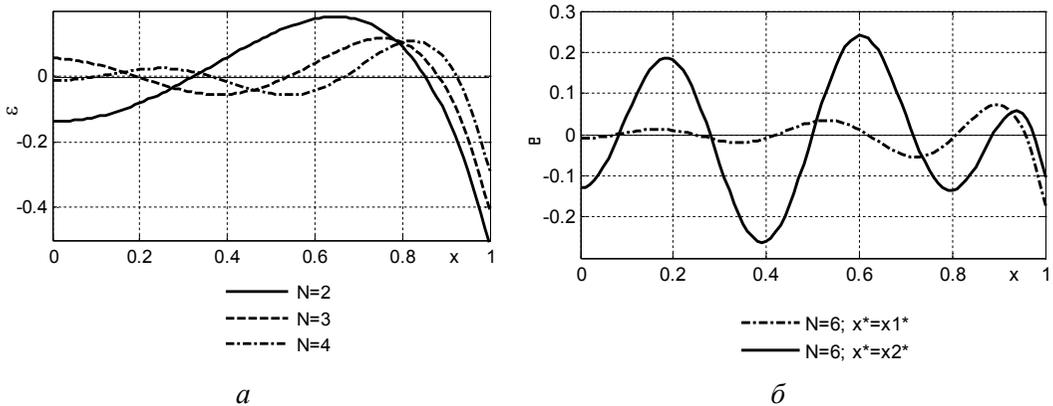


Рис. 3. Ошибка аппроксимации управляющего воздействия

$\varepsilon(x, \varphi^q) = F^*(x, \varphi^q) - F(x, \varphi^q)$ в фиксированный момент времени φ^q при восстановлении $F(x, \varphi)$ по двум, трем и четырем учитываемым модам (а);

по шести модам при различном размещении точек контроля x^{1*} и x^{2*} (б)

При этом поведение расчетного воздействия $F(x, \varphi)$ с увеличением числа учитываемых мод неоднозначно, т. к. абсолютные отклонения во внутренних локальных экстремумах и в граничных точках существенно зависят от расположения точек контроля, а конкретнее, от их близости к нулям учитываемых собственных функций. Поэтому при восстановлении $F(x, \varphi)$ с фиксированным числом N мод $\bar{u}_n(\mu_n, \varphi)$ качественный характер его пространственного распределения не меняется, но максимальное отклонение $\varepsilon(x, \varphi) = \max |F^*(x, \varphi) - F(x, \varphi)|$, задающее абсолютную ошибку идентификации, может наблюдаться в разных точках внутренних экстремумов или на границах пространственной области и значительно различаться по величине. Например, при расположении $N = 6$ наблюдающих устройств в различных точках области изменения пространственной координаты $x^{1*} = (0.1; 0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1)^T$ и $x^{2*} = (0; 0.25; 0.5; 0.8; 0.9; 1)^T$ пространственное распределение ошибки идентификации $F(x, \varphi)$ существенно меняется (рис. 3, б). В связи с этим может быть актуальна задача оптимального расположения точек контроля, минимизирующего погрешность восстановления расчетного управляющего воздействия.

Заключение. Применение рассмотренного подхода для построения системы идентификации пространственно-временного воздействия основано на возможности независимой идентификации различных мод входного воздействия объекта, комбинация которых с заданными собственными функциями при $N < \infty$ приближенно обеспечивает заданное поведение пространственно распределенной величины.

Процесс идентификации распределенного входного воздействия сводится к независимому друг от друга определению каждой из первых N составляющих ряда (8) на основе переменных состояния, характеризующих поведение ОРП, заданное экспериментальными зависимостями, в роли которых выступают временные моды объекта. Основанием для такого решения обратной задачи теплопроводности является ортогональность собственных функций объекта.

Построение такой системы идентификации предусматривает наличие устройств вычисления временных мод объекта по результатам наблюдения текущего состояния в фиксированных точках на основе метода наименьших квадратов (7) и устройств формирования распределенного управляющего воздействия путем взвешенного суммирования с пространственно зависимыми коэффициентами, равными собственным функциям объекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мацевитый Ю.М.* Обратные задачи теплопроводности. В 2-х т. – Киев: Наукова думка, 2002. – 408 с.
2. *Алифанов О.М.* Обратные задачи теплообмена. – М.: Машиностроение, 1988. – 280 с.
3. *Бутковский А.Г.* Структурная теория распределенных систем. – М.: Наука, 1977.
4. *Рей У.* Методы управления технологическими процессами. – М.: Мир, 1983.
5. *Рапопорт Э.Я.* Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003.
6. *Рапопорт Э.Я.* Анализ и синтез систем управления с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2005.
7. *Рапопорт Э.Я., Плещивцева Ю.Э.* Специальные методы оптимизации в обратных задачах теплопроводности // Известия РАН. Энергетика. – 2002. – № 5. – С. 144-155.

Статья поступила в редакцию 6 сентября 2011 г.

ANALITICAL IDENTIFICATION OF SPATIOTEMPORAL CONTROL IN THE INVERSE THERMAL CONDUCTIVITY PROBLEMS ON THE BASIS OF MODAL DESCRIPTION

A.N. Diligenskaya

Samara State Technical University
224, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The problem of identification of the spatiotemporal function of internal heat sources in the inverse thermal conductivity problem is solved. Representation of the control action is based on the modal description in the form of the infinite expansion in terms of orthogonal system of eigenfunctions; the coefficients of this series are temporary modes. Searching for the desired control is reduced to the independent identification of restricted set of temporary modes, linear combination of which provides the approximation of the specified temperature state.

Keywords: *Inverse heat conduction problem, spatial-temporal control of internal heat sources, infinite series expansion, orthogonal system of eigenfunctions of the boundary value problem.*

ПРОГРАММНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ*

Н.В. Дилигенский, А.Н. Давыдов, М.В. Цапенко, Д.А. Барболин

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: usat@samgtu.ru

Рассмотрены вопросы создания и использования программно-аналитического инструментария для многокритериального оценивания эффективности научных исследований, выполняемых в Самарском государственном техническом университете.

Ключевые слова: информационные системы, базы данных, многокритериальное оценивание, эффективность выполнения НИР.

Качество образования и результативность научных исследований в высшем учебном заведении являются основными факторами, определяющими востребованность рынком специалистов и перспективных разработок университета. Существенную роль в управлении качеством проводимых научных исследований играют мониторинг, методы и средства оценки как уровня научного потенциала университета в целом, так и результативности научно-исследовательской работы отдельных подразделений, научных коллективов, преподавателей, аспирантов и студентов.

Для решения этой проблемы в Самарском государственном техническом университете (СамГТУ) была разработана информационно-аналитическая система «Наука». Это многоуровневая система с разграничением прав доступа и удаленным доступом через Интернет, которая позволяет автоматизировать процессы сбора, структурирования и хранения информации о научной деятельности организации.

Применение средств анализа данных OLAP позволяет аналитикам, работающим с системой, в оперативном режиме получать структурированную информацию из хранилища данных в необходимом для дальнейшей обработки виде. Вместе с тем дальнейшее многокритериальное оценивание эффективности научных исследований, например путем получения обобщенных DEA-оценок (Data Envelopment Analysis) [1, 2, 3], остается по-прежнему достаточно трудоемким, предполагающим решение множества задач линейного программирования и использование для этого некоторого «внешнего решателя». При этом довольно трудоемким процессом остается как подготовка исходного массива данных для решателя, так и последующая обработка полученных результатов и их наглядное представление [4, 5, 6]. Потоки данных при получении DEA-оценок с использованием информационно-аналитической системы «Наука» и «внешним решателем» представлены на рис. 1.

* Настоящее исследование проведено в рамках выполнения Государственного контракта Минобрнауки России № 16.740.11.0749.

Николай Владимирович Дилигенский (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Управление и системный анализ в теплоэнергетике».

*Андрей Николаевич Давыдов (к.т.н., доц.), начальник управления научных исследований.
Михаил Владимирович Цапенко (к.э.н., доц.), доцент кафедры «Управление и системный анализ в теплоэнергетике».*

Дмитрий Алексеевич Барболин, инженер информационно-вычислительного центра.

Для более оперативного и точного многокритериального оценивания эффективности научных исследований разработан и внедрен в информационную систему модуль «Интерфейс аналитика», а также «внутренний решатель» на базе *Solver Foundation* (библиотеки для математического программирования, моделирования и оптимизации) [7]. Разработанный механизм позволяет аналитику самостоятельно формировать необходимый для анализа массив данных и в оперативном режиме получить по нему DEA-оценку (рис. 2).

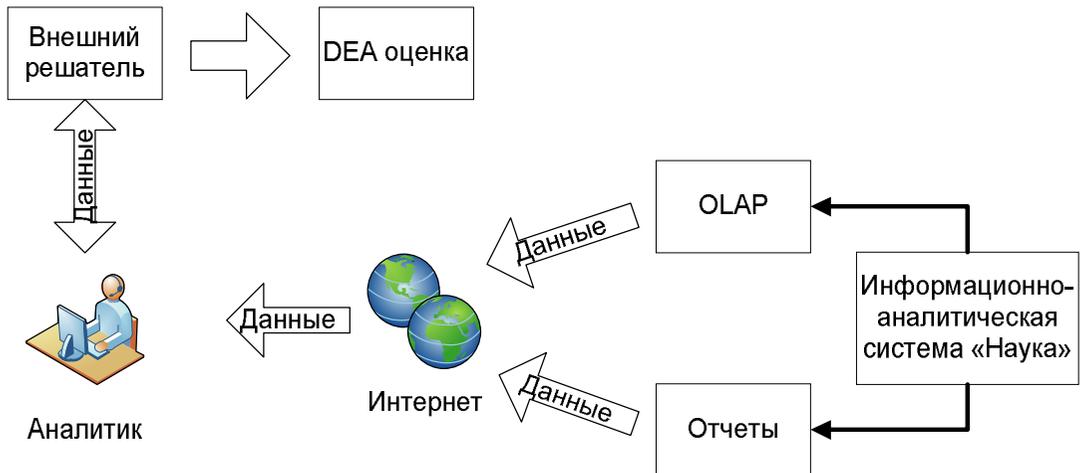


Рис. 1. Поток данных при получении сравнительной DEA-оценки с использованием «внешнего решателя»

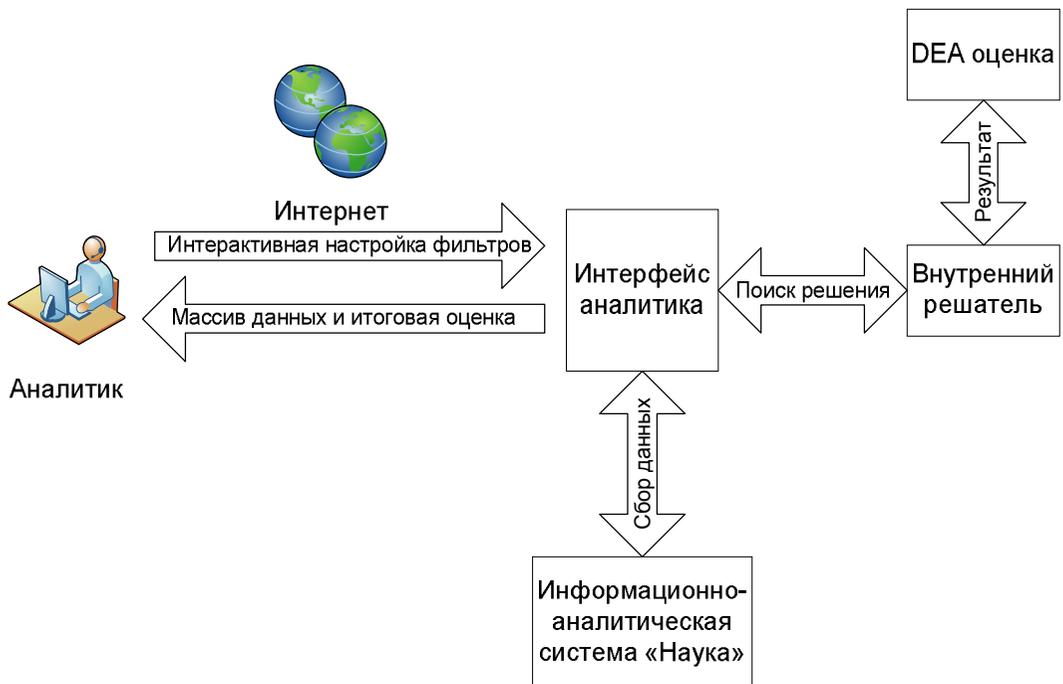


Рис. 2. Поток данных при получении сравнительной DEA-оценки с использованием «интерфейса аналитика»

Для получения DEA-оценки необходимо сформировать исходный массив данных из некоторого множества существующей в хранилище информации. Для этого необходимо определить параметры фильтров, с помощью которых будет выделен требуемый массив данных. Настройка фильтров состоит из нескольких шагов:

- 1) выбор структуры для формирования результатов. Например: факультеты, кафедры, научные коллективы, отдельные ученые, аспиранты и др.;
- 2) формирование совокупности частных или обобщенных показателей, по которым будет проводиться анализ;
- 3) задание временного периода, для которого будет выполнена оценка эффективности.

После настройки необходимых фильтров (структура – показатели – период) система полностью готова для формирования исходного массива данных и расчета DEA-оценок эффективности научных исследований. На рис. 3 показан расчетный цикл формирования набора данных и вычисления DEA-оценки.

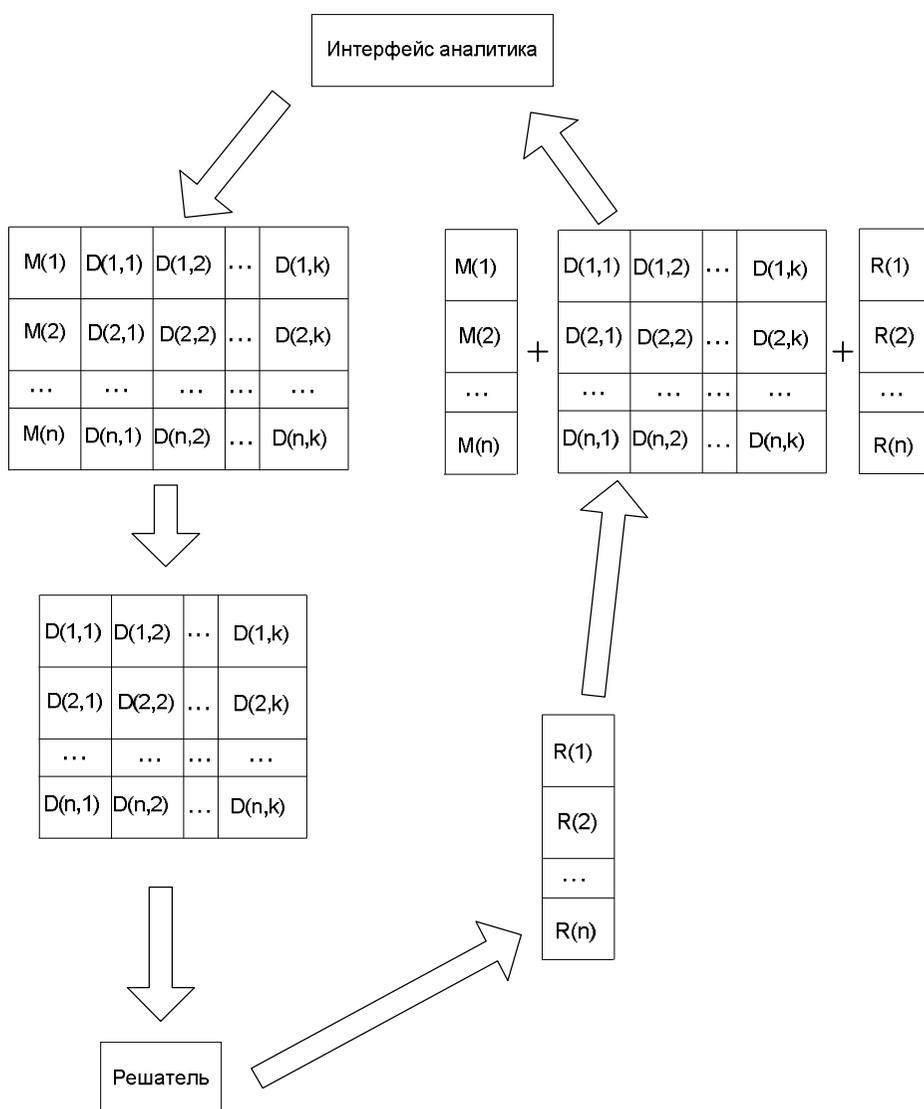


Рис. 3. Расчетный цикл вычисления DEA-оценки эффективности научной деятельности

Исходный массив данных состоит из двух подмножеств: вектора-столбца $M(n)$ – списка из n подразделений (групп авторов или персон), который является маркером для собираемых показателей научной деятельности, а также матрицы численных значений показателей $D(n, k)$, где n – число подразделений (групп авторов или персон); k – число показателей. Для расчета оценки массив $M(n)$ не нужен, поэтому из полученного набора данных выделяется только значимая часть с результатами $D(n, k)$. Полученный результирующий набор отправляется на решение. Поиск решения вынесен в отдельный сервис, принимающий на вход числовую матрицу исходных данных. Размерность матрицы не ограничена и определяется установленными значениями n и k . Полученные результаты DEA-оценок эффективности научной деятельности в виде численного массива $R(n)$ возвращаются сервисом обратно в «интерфейс аналитика», где вместе с исходными массивами структуры и показателей представляются в удобном для аналитика виде.

Проиллюстрируем применение разработанного программно-аналитического инструментария для многокритериального сравнительного оценивания эффективности научно-исследовательских работ, выполненных в 2011 г. в университете в рамках государственного задания. Для расчета сравнительных DEA-оценок выберем три основных группы показателей, по которым Минобрнауки оценивает эффективность выполнения государственного задания вузом в целом.

На рис. 4 и 5 приведены экранная форма и результаты сравнительной оценки НИР по показателям публикаций (статьи, тезисы докладов, монографии, учебники и учебные пособия).

Показатели:

- Статьи (Количество)
- Тезисы (Количество)
- Монографии (Количество)
- Учебники и учебные пособия (Количество)

Учебники и учебные пособия Количество Добавить Очистить

НИР: 517/11; 516/11; 529/11; 515/11; 508/11; 520/11; 527/11; 505/11; 504/11; 514/11; 534/11; 511/11; 523/11; 527/11; 513/11; 539/11; 519/11; 526/11; 528/11; 534/11; 537/11; 506/11; 502/11; 501/11; 553/11; 533/11; 509/11; 535/11; 532/11; 524/11; 550/11; 530/11; 503/11; 549/11; 522/11; 556/11; 510/11; 500/11; 512/11; 531/11; 518/11; 507/11; 532/11; 521/11; 525/11; 551/11; 558/11;

НИР Участники НИР

Период: Периоды: 2011 2 полугодие; 2011 1 полугодие;
Периоды

Проанализировать

	Статьи (Количество)	Тезисы (Количество)	Монографии (Количество)	Учебники и учебные пособия (Количество)	Результат
500/11	21	7	0	2	0,692982456140351
501/11	23	1	1	0	0,464285714285714
502/11	11	3	0	2	0,666666666666667
503/11	18	1	2	3	1
504/11	10	0	0	2	0,666666666666667
505/11	38	21	3	2	1
506/11	23	10	0	3	1
507/11	35	17	0	2	0,815789473684211
508/11	25	19	0	3	1
509/11	21	0	0	0	0,375
510/11	4	4	0	0	0,125
511/11	31	13	0	1	0,553571428571429
512/11	13	5	1	2	0,666666666666667
513/11	28	27	0	2	0,927536231884058
514/11	13	1	0	2	0,666666666666667
515/11	19	0	1	0	0,392857142857143
516/11	9	6	2	3	1
517/11	15	10	0	2	0,666666666666667
518/11	10	13	1	3	1
519/11	8	3	1	0	0,333333333333333
520/11	29	0	1	2	0,794117647058823
521/11	8	7	0	0	0,21875
522/11	9	3	0	0	0,160714285714286
523/11	15	6	2	0	0,666666666666667
524/11	18	27	0	0	0,84375

Рис. 4. Экранная форма для оценки эффективности научно-исследовательских работ, выполняемых в рамках государственного задания, по публикациям

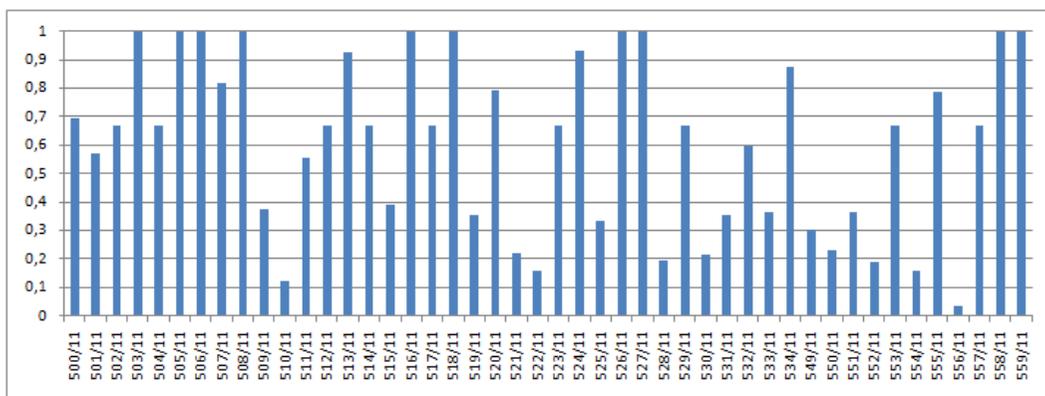


Рис. 5. Результаты сравнительной оценки НИР по публикациям

На рис. 6 приведены результаты сравнительной оценки НИР по участию коллективов в подготовке кадров высшей квалификации (защиты диссертаций, работа в диссертационных советах).

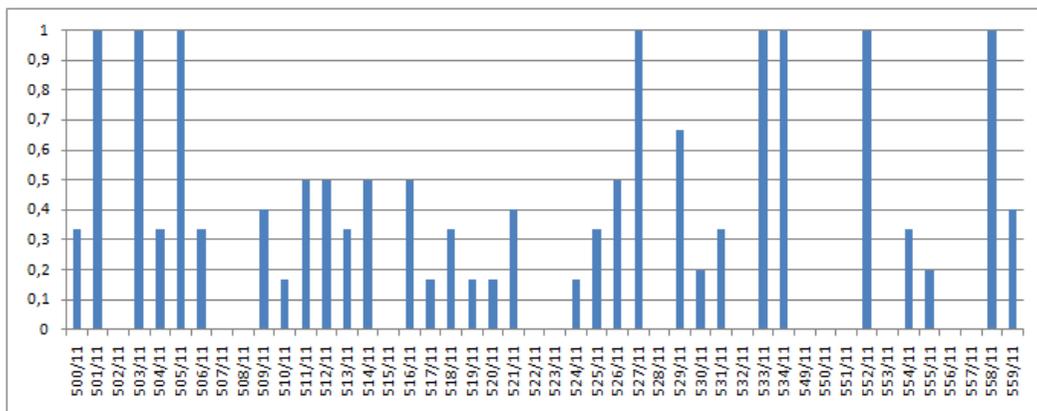


Рис. 6. Результаты сравнительной оценки НИР по участию в подготовке кадров высшей квалификации

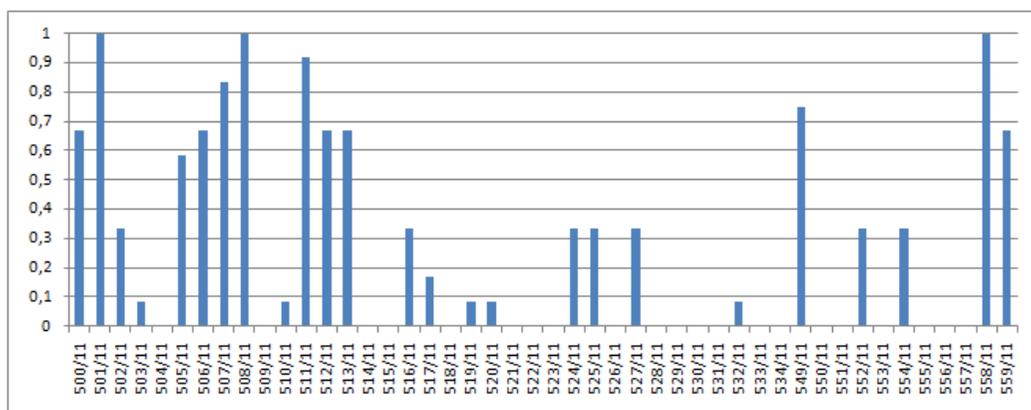


Рис. 7. Результаты сравнительной оценки НИР по результативности патентно-изобретательской деятельности

На рис. 7 приведены результаты сравнительной оценки НИР по результативности патентно-изобретательской деятельности.

Из результатов сравнительного многокритериального анализа видно, что коллективы исполнителей НИР имеют существенно разный уровень эффективности выполнения НИР в рамках государственного задания. Причем для каждой из групп показателей есть коллективы, имеющие максимальную оценку, а по группам показателей «Подготовка кадров высшей квалификации» и «Патентно-изобретательская деятельность» есть коллективы, совсем не имеющие показателей. Среди 46 научно-исследовательских работ имеется всего одна, у которой максимальная оценка по всем трем группам показателей (НИР №558/11). К наименее эффективно выполняемым НИР следует отнести темы №522/11, 528/11, 550/11, 551/11, 556/11. Эти НИР имеют низкую DEA-оценку по показателям группы «Публикации» и совсем не имеют показателей по двум другим группам.

Таким образом, разработанный программно-аналитический инструментарий для многокритериальной оценки эффективности научной деятельности подразделений, научных коллективов и отдельных персон позволяет в интерактивном режиме рассчитывать DEA-оценку эффективности научных исследований на основе информации о показателях, имеющихся в информационно-аналитической системе «Наука». Специально созданный модуль системы «Интерфейс аналитика» существенно упрощает процесс подготовки исходных данных для расчета и позволяет наглядно визуализировать его результаты. В качестве решателя для вычисления DEA-оценки эффективности научной деятельности использовались алгоритмы и процедуры библиотеки математического программирования, моделирования и оптимизации *Solver Foundation* версии 3.1.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. HANDBOOK ON DATA ENVELOPMENT ANALYSIS edited by: *William W. Cooper, Lawrence M. Seiford, Joe Zhu* // Kluwer Academic Publishers, 2004. – 593 p.
2. *Farrel M.J.* The Measurement of Productive Efficiency // *Journal of the Royal Statistical Society, Series A (General)*, Vol. 120, Part III, 1957, 253 – 281 p.
3. *Charnes A., Cooper W., Rhodes E.* Measuring the Efficiency of Decision Making Units // *European Journal of Operational Research*, Vol. 2, 1978, pp. 429 – 444.
4. *Дилигенский Н.В., Цапенко М.В.* Методология DEA: оценка эффективности экономических объектов, анализ метода и свойств решений // Межвузовский сборник научных трудов «Высшее образование, бизнес, предпринимательство – 2001». – Самара: СамГТУ, Поволжский институт бизнеса, 2001. – С. 149-159.
5. *Дилигенский Н.В., Цапенко М.В., Давыдов А.Н.* Методология и технологии формирования и классификации знаний о деятельности научных коллективов // Труды XII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». – Самара: СНЦ РАН, 2011. – С. 95-103.
6. *Дилигенский Н.В., Цапенко М.В., Давыдов А.Н.* Многокритериальная методология выявления перспективных направлений научных исследований // Вестник Самарского государственного технического университета №4 (32). Сер. Технические науки. – Самара, 2011. – С. 26-33.
7. *Макленнен Дж., Танг Ч., Криват Б.* Microsoft SQL Server 2008: Data Mining – интеллектуальный анализ данных. – BHV, 2009. – 720 с.

Статья поступила в редакцию 4 сентября 2011 г.

SOFTWARE AND ANALYTICAL TOOLS FOR MULTICRITERIAL EVALUATION OF SCIENTIFIC RESEARCH EFFICIENCY

N.V. Diligensky, A.N. Davydov, M.V. Tsapenko, D.A. Barbolin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

This paper discusses the issues of the creation and use of software and analytical tools for multi-criterial evaluation of the effectiveness of scientific research carried out in Samara State Technical University.

Keywords: *information systems, databases, multi-criteria evaluation, the effectiveness of the implementation of research.*

*Nikolay V. Diligensky (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Andrey N. Davydov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Michail V. Tsapenko (Ph.D. (Econ.)), Associate professor.
Dmitry A. Barbolin, Engineer.*

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА В УСЛОВИЯХ ИНТЕРВАЛЬНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА*

И.С. Левин, Э.Я. Рапопорт

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: levin_ilja@yahoo.com; rapoport@samgtu.ru

Рассмотрена задача синтеза системы оптимального по быстродействию управления не полностью определенными моделями объектов с распределенными параметрами. Произведен синтез оптимального по быстродействию регулятора для процесса индукционного нагрева и предложена структура идентификатора параметрических характеристик объекта управления.

Ключевые слова: система с распределенными параметрами, индукционный нагрев, управление в условиях интервальной неопределенности, синтез оптимального регулятора.

Постановка задачи. Типичной является ситуация, когда характеристики процесса индукционного нагрева, рассматриваемого в качестве объекта управления, определены не полностью. Это обусловлено неточным знанием его параметров и действием неконтролируемых внешних возмущений. Обычно речь идет об интервальной неопределенности неизвестных величин, информация о которых исчерпывается заданными границами диапазона изменения их возможных значений. В связи с этим возникает актуальная задача синтеза управляющих алгоритмов для подобных объектов управления.

В данной статье рассматривается задача синтеза оптимальной по быстродействию системы автоматического управления (САУ) процессом индукционного нагрева металлических полуфабрикатов под обработку давлением с неполным измерением состояния в условиях интервальной неопределенности.

Процесс индукционного нагрева металлических изделий цилиндрической формы с сосредоточенным управляющим воздействием по мощности внутреннего тепловыделения $u(t)$ можно в линейном приближении описать бесконечной системой дифференциальных уравнений для временных мод $\bar{\theta}_n(\mu_n, t)$ разложения температурного поля $\theta(x, t)$ в ряд по собственным функциям $J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right)$ радиальной координаты $x \in [0, R]$ [1]:

$$\frac{d\bar{\theta}_n(\mu_n, t)}{dt} = -\mu_n^2 \bar{\theta}_n(\mu_n, t) + \frac{1}{c\gamma} \bar{F}_{b1n}(\mu_n, \nu) u(t) + d_{1n} \theta_C(t), t \in [0, t_1], n = 1, 2, \dots; \quad (1)$$

$$\bar{\theta}_n(\mu_n, 0) = \bar{\theta}_0^{(0)}(\mu_n).$$

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00277).

Илья Сергеевич Левин, магистрант.

Эдгар Яковлевич Рапопорт (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

На управляющее воздействие $u(t)$ накладывается следующее ограничение:

$$0 \leq u(t) \leq u_{\max} \quad \forall t \in [0, t_1] \quad (2)$$

Здесь R – радиус цилиндра; c, γ – удельная теплоемкость и плотность материала; $\bar{\theta}_0^{(0)}(\mu_n)$ – моды разложения заданных равномерных начальных распределений температур $\theta(x, 0) = \theta_0 = const$ в бесконечные ряды по системе собственных функций; $\mu_n^2 = \frac{\alpha \eta_n^2}{R^2}$ – собственные числа; $\eta_n, n = 1, 2, \dots$ – бесконечно возрастающая последовательность корней уравнения $BiJ_0(\eta) - \eta J_1(\eta) = 0$; Bi – безразмерный критерий Био, характеризующий уровень тепловых потерь с поверхности цилиндра в процессе нагрева; $J_i(\eta), i = 0, 1$ – функции Бесселя нулевого и первого порядка; d_{1n} – известные коэффициенты; $\theta(x, t)$ – температурное поле нагреваемого металлического изделия, изменяющееся во времени t и по радиальной координате x , которое описывается следующим выражением:

$$\theta(x, t) = \theta_0 + \frac{1}{c\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{b1n}(\eta_n, v) \eta_n^2 J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0^2(\eta_n)} \int_0^{t_1} e^{-\mu_n^2(t-\tau)} u(\tau) d\tau; \quad (3)$$

$\theta_C(t)$ – температура окружающей среды; $\bar{F}_{b1n}(\eta_n, v)$ – моды функции пространственного распределения по радиусу цилиндра внутренних источников тепла, определяемые по формуле

$$\bar{F}_{b1n}(\eta_n, v) = \int_0^1 F_{b1}(l, v) J_0(\eta_n l) dl, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (4)$$

где $F_{b1}(l, v) = v \frac{\text{ber}'^2(vl) + \text{bei}'^2(vl)}{\text{ber } v \text{ber}'v + \text{bei } v \text{bei}'v}$; $l = \frac{x}{R}$; $v = R\sqrt{2\pi\mu_a f\sigma}$; f – частота питающего индуктор тока; σ – электропроводность нагреваемого материала; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость нагреваемого материала; $\text{ber } z, \text{bei } z, \text{ber}'z, \text{bei}'z$ – функции Кельвина и их первые производные; λ – коэффициент теплопроводности.

Пусть далее начальная температура θ_0 и величина Bi критерия Био определены с точностью до принадлежности заданным интервалам их возможных значений: $\theta_0 \in [\theta_{0\min}, \theta_{0\max}]$; $Bi \in [Bi_{\min}, Bi_{\max}]$. Тогда вектор неопределенных факторов определяется как $y = (\theta_0, Bi) \in Y$, где Y – множество всех допустимых по указанным ограничениям комбинаций величин θ_0 и Bi .

Сформулируем задачу синтеза оптимальной по быстродействию САУ. Для ее постановки необходимо привести выражение для критерия быстродействия и задать требования к конечному состоянию объекта.

Критерий оптимального быстродействия записывается в интегральной форме:

$$I = \int_0^{t_1} dt = t_1 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где t_1 – длительность процесса нагрева.

В случае, когда в САУ может быть получена в реальном масштабе времени достоверная информация о реализуемой в каждом конкретном случае величине

$y = \tilde{y} \in Y$ путем наблюдения за поведением управляемой величины, требования к конечному температурному состоянию $\theta(x, \tilde{y}, t_1)$ записываются в виде неравенства [1]

$$\max_{x \in [0, R]} |\theta(x, \tilde{y}, t_1) - \theta^{**}| \leq \tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y}) \quad (6)$$

с учетом заданного в равномерной метрике допуска $\tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y}) \leq \varepsilon_0$ на отклонение конечного температурного состояния $\theta(x, \tilde{y}, t_1)$ от заданного равномерного распределения температур $\theta^{**}(x)$ по радиусу цилиндра $\theta^{**}(x) \equiv \theta^{**} = const$.

Применительно к модальному представлению объекта требования (6) после замены температурного поля $\theta(x, \tilde{y}, t_1)$ его разложением в ряд по собственным функциям $J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right)$ принимают следующий вид:

$$\max_{x \in [0, R]} \left| \sum_{n=1}^{\infty} \bar{\theta}_n(\mu_n, \tilde{y}, t_1) J_0\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) - \theta^{**} \right| \leq \tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y}). \quad (7)$$

Теперь задача оптимального быстрогодействия может быть сформулирована следующим образом.

Необходимо найти такое программное оптимальное управление $u^*(t)$ в условиях заданных ограничений (4), которое переводит объект, описываемый бесконечной системой уравнений (1), из заданного начального в требуемое конечное состояние (7) за минимально возможное время $t_1 = t_{1\min}$ для каждой из допустимых величин $y = \tilde{y} = (\theta_0^*, Bi^*) \in Y$.

Если пренебречь инерционностью и погрешностями процедур наблюдения и идентификации, величина \tilde{y} определяется по некоторой заранее фиксируемой детерминированной зависимости $F(\theta_u(x, t))$ от результатов всегда неполного наблюдения $\theta_u(x, t)$ за текущим состоянием $\theta(x, t)$ объекта:

$$\tilde{y} = F(\theta_u(x, t)), \quad (8)$$

где $\theta_u(x, t)$ и $F(\theta_u(x, t))$ выбираются из условия минимальной сложности технической реализации САУ.

В итоге возникает задача проектирования идентификатора (8) и синтеза регулятора $u = u(\theta_u(x, t))$, обеспечивающих решение детерминированной краевой задачи (1) – (3), (7), (8) за минимально возможное время $t_{1\min}$ при некоторых зафиксированных значениях θ_0 и Bi .

Алгоритмы оптимального по быстродействию управления в условиях интервальной неопределенности параметров объекта. Пусть теперь требуется определить алгоритм оптимального по быстродействию управления с обратными связями, обеспечивающий решение задачи оптимизации (1) – (3), (7), (8) для каждого из допустимых значений $y = \tilde{y} \in Y$. Для этого сначала рассмотрим детерминированную задачу синтеза оптимальной по быстродействию САУ (1) – (3), (7), (8) для любого заранее фиксируемого значения $y = \tilde{y} \in Y$.

Синтез оптимального регулятора по общему методу фазового пространства приводит к технически нереализуемому алгоритму релейного управления [2]

$$u^*(\bar{\theta}) = \frac{u_{\max}}{2} \cdot [1 \pm \text{sign} h(\bar{\theta})] \bar{\theta} = (\bar{\theta}_n), n = 1, 2, \dots \quad (9)$$

с обратными связями по всем координатам вектора $\bar{\theta}$ и гиперповерхностью переключения $h(\bar{\theta}) = 0$, определение которой в бесконечном пространстве $\bar{\theta}_n$ представляет собой практически невыполнимую задачу.

Переход к вполне реализуемой структуре замкнутой системы с неполным измерением функции $\theta(\tilde{x}_j, t) = \theta_j(t), j = \overline{1, N}$ состояния объекта в некоторых N точках $\tilde{x}_j \in [0, R]$ пространственной области ее распределения выполняется путем выбора другой функции переключения $h_1(\bar{\theta}, \tilde{y})$ в форме линейной комбинации N сигналов обратной связи по измеряемым величинам $\theta_j(t), \theta_j(t_1) = \theta_j^T(\tilde{y})$ с коэффициентами передачи $\rho_j(\tilde{y})$ [2]:

$$h_1(\bar{\theta}, \tilde{y}) = \sum_{j=1}^N \rho_j(\tilde{y})(\theta_j^T(\tilde{y}) - \theta_j(t)). \quad (10)$$

При выборе в качестве $\rho_j(\tilde{y})$ нетривиальных решений однородной системы $N - 1$ линейных уравнений с N неизвестными

$$\sum_{j=1}^N \rho_j(\tilde{y})(\theta_j^T(\tilde{y}) - \theta_j(\tilde{t}_m)) = 0, m = \overline{1, N-1}, \quad (11)$$

где $\tilde{t}_m, m = \overline{1, N-1}$ – расчетные моменты времени переключения оптимальной программы $u^*(t)$ релейной формы с N интервалами постоянства длительностью $\Delta_i^0, i = \overline{1, N}$, определяемые вместе с $\theta_j(\tilde{t}_m)$ и $\theta_j^T(\tilde{y})$ для заданной величины $\tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y})$ при расчете $u^*(t)$ альтернансным методом [2], функция $h_1(\bar{\theta}, \tilde{y})$ в (10) меняет знак при переходе через нуль вместе с $h(\bar{\theta})$ в расчетные моменты времени \tilde{t}_m , и только в эти моменты, в силу чебышевских свойств функции $h_1(\bar{\theta}, \tilde{y})$ [2].

Полагаем, что для $\tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y})$ в (7) $N = \text{const} \forall \tilde{y} \in Y$ и определяется в соответствии с правилом [2]

$$\varepsilon_{\min}^{(1)} > \varepsilon_{\min}^{(2)} > \dots > \varepsilon_{\min}^{(j)} > \varepsilon_{\min}^{(j+1)} > \dots > \varepsilon_{\min}^{(s)} = \varepsilon_{\inf} \geq 0, j = \overline{1, s}; \quad (12)$$

$$N = \nu \forall \varepsilon_0 : \varepsilon_{\min}^{(\nu)} \leq \tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y}) < \varepsilon_{\min}^{(\nu-1)}, \nu \in \{\overline{1, s}\};$$

где $\varepsilon_{\min}^{(j)}$ – минимально допустимая величина $\tilde{\varepsilon}_0(\tilde{y})$ в (7) в классе релейных управлений $u(t)$ с j интервалами постоянства.

Таким образом, алгоритм управления в детерминированной задаче быстрогодействия имеет следующий вид:

$$u^*(\bar{\theta}) = \frac{u_{\max}}{2} \cdot [1 \pm \text{sign} h_1(\bar{\theta}, \tilde{y})] \quad (13)$$

Как уже было отмечено выше, для построения замкнутой системы оптимального по быстродействию управления с регулятором (10), (11), (13) в условиях интервальной неопределенности $y \in Y$ необходимо дополнить ее структуру идентификатором (8) реализуемых величин \tilde{y} по результатам наблюдения текущего состояния

$\theta_u(x, t) = \theta(\bar{x}_j, t) = \bar{\theta}_j(t)$ в некоторых r точках $\bar{x}_j \in [0, R]$, $j = \overline{1, r}$, частично или полностью совпадающего с измеряемыми величинами $\theta_j(x, t)$ в (25) – (27):

$$\bar{\theta}_j(t) = \theta_j(t), j = \overline{1, p}; p = \min\{N, r\}. \quad (14)$$

Интегрирование уравнений (1) в некоторый заданный момент времени $t_\Phi \in (0, \Delta_1^0)$ позволяет найти в форме (3) зависимости $g_j(\tilde{y}, t_\Phi)$ величин $\bar{\theta}_j(t_\Phi), j = \overline{1, r}$, от \tilde{y} .

Тогда при r неопределенных факторах $(\tilde{y}^{(m)})$, $m = \overline{1, r}$; $\tilde{y} = (\tilde{y}^{(m)})$ система равенств

$$\bar{\theta}_j(t_\Phi) = g_j(\tilde{y}^{(1)}, \tilde{y}^{(2)}, \dots, \tilde{y}^{(r)}, t_\Phi), j = \overline{1, r}, \tilde{y} \in Y \quad (15)$$

определяет реализуемые значения \tilde{y} в окрестности некоторой номинальной точки $\tilde{y} = y_H$ как неявно заданные, однозначные, непрерывные и непрерывно дифференцируемые по всем аргументам функции

$$\tilde{y}^{(m)} = F_m(\bar{\theta}_1(t_\Phi), \bar{\theta}_2(t_\Phi), \dots, \bar{\theta}_r(t_\Phi)), m = \overline{1, r} \quad (16)$$

от наблюдаемых переменных $\bar{\theta}_j(t_\Phi)$ при условии, что якобиан системы (15)

$$J = \frac{D(g_1^*, \dots, g_r^*)}{D(\tilde{y}^{(1)}, \dots, \tilde{y}^{(r)})} = \begin{vmatrix} \frac{\partial g_1^*}{\partial \tilde{y}^{(1)}} & \frac{\partial g_1^*}{\partial \tilde{y}^{(2)}} & \dots & \frac{\partial g_1^*}{\partial \tilde{y}^{(r)}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_r^*}{\partial \tilde{y}^{(1)}} & \frac{\partial g_r^*}{\partial \tilde{y}^{(2)}} & \dots & \frac{\partial g_r^*}{\partial \tilde{y}^{(r)}} \end{vmatrix} \quad (17)$$

не равен нулю в точке $\tilde{y} = y_H$ [3]. Здесь

$$g_j^*(\tilde{y}^{(1)}, \dots, \tilde{y}^{(r)}, \bar{\theta}_1(t_\Phi), \dots, \bar{\theta}_r(t_\Phi)) = g_j(\tilde{y}^{(1)}, \dots, \tilde{y}^{(r)}) - \bar{\theta}_j(t_\Phi). \quad (18)$$

Воспользовавшись известными правилами дифференцирования неявно заданных функций [4], можно заранее вычислить производные $\frac{\partial \tilde{y}^{(m)}}{\partial \bar{\theta}_j^k}$, $k \geq 1$ в точке

$\tilde{y} = y_H$, $\bar{\theta}_{jH} = \bar{\theta}_j(y_H, t_\Phi), j = \overline{1, r}$:

$$\left(\frac{\partial \tilde{y}^{(m)}}{\partial \bar{\theta}_j} \right)_{\tilde{y}=y_H} = - \left[\frac{1}{J} \cdot \frac{D(g_1^*, \dots, g_r^*)}{D(\tilde{y}^{(1)}, \dots, \tilde{y}^{(m-1)}, \bar{\theta}_j, \tilde{y}^{(m+1)}, \dots, \tilde{y}^{(r)})} \right]_{\tilde{y}=y_H}. \quad (19)$$

Аналогичным образом могут быть вычислены и производные высшего порядка.

Функция F в уравнении идентификатора (8) определяется по значениям

$$\left(\frac{\partial^k \tilde{y}^{(m)}}{\partial \bar{\theta}_j^k} \right)_{\tilde{y}=y_H}, k = \overline{1, s} \text{ с требуемой точностью, фиксируемой числом } s \geq 1, \text{ путем ее}$$

разложения в ряд Тейлора по степеням $\bar{\theta}_j$ [3]. Для случая $s = 1$, которым ограничиваются в типичных ситуациях, равенства (16) можно представить в линейном приближении в виде суммы сигналов линейных обратных связей по наблюдаемым переменным $\bar{\theta}_j(t_\Phi)$ с вычисленными по (19) коэффициентами передачи α_{mj} :

$$\begin{aligned}\tilde{y}^{(m)} &= \tilde{y}_H^{(m)} + \sum_{j=1}^r \alpha_{mj} (\bar{\theta}_j(t_\Phi) - \bar{\theta}_{jH}); \\ \alpha_{mj} &= \left(\frac{\partial \tilde{y}^{(m)}}{\partial \bar{\theta}_j} \right)_{\tilde{y}=y_H}; \quad \bar{\theta}_{jH} = g_j(y_H, t_\Phi), \quad m = \overline{1, r}.\end{aligned}\quad (20)$$

Аналогично по известным зависимостям $\rho_i(\tilde{y}), i = \overline{1, N}$, которые определяются предварительным решением системы уравнений (11) для различных $\tilde{y} \in Y$, находятся их линейные приближения:

$$\begin{aligned}\rho_i(\tilde{y}) &= \rho_i(y_H) + \sum_{j=1}^r \beta_{mj} (\tilde{y}^{(m)} - \tilde{y}_H^{(m)}); \\ \beta_{mj} &= \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial \tilde{y}^{(m)}} \right)_{\tilde{y}=y_H}; \quad i = \overline{1, N}.\end{aligned}\quad (21)$$

С учетом (20), (21) получаем линейные приближения алгоритма автоматической коррекции коэффициентов обратных связей и определяемых подобным образом заданных конечных значений θ_j^T измеряемых величин $\tilde{\theta}_j(t)$:

$$\rho_i(\tilde{y}) = \rho_i(y_H) + \sum_{j=1}^r \gamma_{ij} (\bar{\theta}_j(t_\Phi) - \bar{\theta}_{jH}); \quad (22)$$

$$\gamma_{ij} = \sum_{m=1}^r \alpha_{mj} \beta_{mi}; \quad i = \overline{1, N};$$

$$\theta_i^T(\tilde{y}) = \theta_i^T(y_H) + \sum_{j=1}^r \gamma_{ij}^* (\bar{\theta}_j(t_\Phi) - \bar{\theta}_{jH}); \quad (23)$$

$$\gamma_{ij}^* = \sum_{m=1}^r \alpha_{mj} \beta_{mi}^*; \quad \beta_{mi}^* = \left(\frac{\partial \theta_i^T}{\partial \tilde{y}^{(m)}} \right)_{\tilde{y}=y_H}; \quad i = \overline{1, N}.$$

Таким образом, структурно-параметрический синтез замкнутой системы оптимального по быстродействию управления процессом индукционного нагрева при неполном измерении состояния в условиях интервальной неопределенности параметров объекта $y \in Y$ определяется алгоритмом управления (10), (11), (13) с автоматически определяемыми идентификатором (20) – (23) коэффициентами обратных связей и конечными значениями контролируемых температур при априори фиксируемых коэффициентах $\gamma_{ij}, \gamma_{ij}^*$. При этом величины $\rho_i(y_H), \theta_i^T(y_H), \bar{\theta}_{jH}$ предварительно определяются при расчете программного управления альтернативным методом для случая $y = y_H$.

Оптимальное управление процессом индукционного нагрева. В качестве типичного примера рассмотрим задачу синтеза оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева металлических изделий цилиндрической формы, математическая модель которого представлена уравнениями (1) – (4).

Пусть в соответствии с требованиями (7) к конечному температурному состоянию требуется обеспечить равномерный нагрев тела до заданной температуры $\theta^{**} = const$ с предельно достижимой в классе оптимальных по быстродействию двухинтервальных управляющих воздействий $u(t)$ релейной формы (рис. 1) абсолютной точностью $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\min}^{(2)}$ за минимально возможное время $t_1 = t_{1\min}$ при равномерно распределенной начальной температуре $\theta_0(x) = \theta_0 = const < \theta^{**}$ в условиях интервальной неопределенности по величинам θ_0 и Bi .

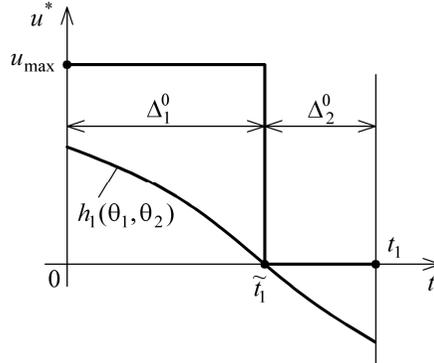


Рис. 1. Оптимальное по быстродействию двухинтервальное управление по мощности внутренних источников тепла

В условиях полной информации о значениях параметров объекта функция переключения (10) в данном случае формируется при $r = N = 2$ интервалах постоянства оптимального управления с сигналами обратной связи по температуре в точках \tilde{x}_1 и \tilde{x}_2 по радиусу цилиндра, в качестве которых удобно принять точки $\tilde{x}_1 = R$ и $\tilde{x}_2 = 0$, где результирующие значения температур θ_1^T и θ_2^T в конце оптимального процесса независимо от начальной температуры будут равны минимально допустимым величинам $\theta^{**} - \varepsilon_{\min}^{(2)}$, что вытекает из альтернансных соотношений для $\theta(x, \Delta^0)$ [1, 2]. В таком случае $\theta_j(t) = \bar{\theta}_j(t)$, $j = r = N = 2$ в (14) и $\theta_1(t) = \theta(R, t)$; $\theta_2(t) = \theta(0, t)$. Положим для определенности $\rho_1 = 1$, тогда функция переключения примет следующий вид:

$$h_1(\theta_1, \theta_2) = \theta^{**} - \varepsilon_{\min}^{(2)} - \theta(R, t) + \rho_2 \left(\theta^{**} - \varepsilon_{\min}^{(2)} - \theta(0, t) \right) \quad (24)$$

В соответствии с (13) алгоритм оптимального управления с обратной связью определяется выражением

$$u^* = \frac{u_{\max}}{2} \left[1 + \text{sign} \left(\theta^{**} - \varepsilon_{\min}^{(2)} - \theta(R, t) + \rho_2 \left(\theta^{**} - \varepsilon_{\min}^{(2)} - \theta(0, t) \right) \right) \right], \quad (25)$$

где коэффициент ρ_2 обратной связи определяется известным способом по результатам расчета программного управления альтернансным методом.

Как было отмечено ранее, для построения замкнутой системы оптимального по быстродействию управления с алгоритмом управления (25) в условиях интервальной неопределенности требуется дополнить ее структуру идентификатором реализуемых величин \tilde{y} , где в данном случае $\tilde{y} = (\tilde{y}^{(1)}, \tilde{y}^{(2)})$, $\tilde{y}^{(1)} = \theta_0$; $\tilde{y}^{(2)} = Bi$.

Тогда выражение (16) для реализуемых значений \tilde{y} примет вид

$$\tilde{y}^{(m)} = F_m \left(\bar{\theta}_1(t_\Phi), \bar{\theta}_2(t_\Phi) \right), \quad m = 1, 2, \quad (26)$$

где $\bar{\theta}_1(t_\Phi)$ и $\bar{\theta}_2(t_\Phi)$ определяются по известным решениям уравнения объекта при $u(t) = u_{\max}$, $t = t_\Phi$ [1,2]:

$$\theta_1(t_\Phi) = \theta(R, \Delta_1^0) = \theta_0 + \frac{u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{bln}(\eta_n, \nu)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0(\eta_n)} \left(1 - e^{-\mu_n^2 t_\Phi}\right); \quad (27)$$

$$\theta_2(t_\Phi) = \theta(0, \Delta_1^0) = \theta_0 + \frac{u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\bar{F}_{bln}(\eta_n, \nu)}{(\eta_n^2 + Bi^2) J_0^2(\eta_n)} \left(1 - e^{-\mu_n^2 t_\Phi}\right). \quad (28)$$

Якобиан (17) системы (15) принимает теперь следующий вид:

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial \tilde{y}^{(1)}} & \frac{\partial g_1}{\partial \tilde{y}^{(2)}} \\ \frac{\partial g_2}{\partial \tilde{y}^{(1)}} & \frac{\partial g_2}{\partial \tilde{y}^{(2)}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Q_0} & \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi} \\ \frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Q_0} & \frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi} \\ 1 & \frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi} \end{vmatrix} = \frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi} - \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi}, \quad (29)$$

где $\frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi}$ и $\frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi}$ находятся путем дифференцирования выражений (27), (28) и имеют следующий вид:

$$\frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi} = \frac{2u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G \cdot s - \bar{F}_{bln}(\eta_n(Bi), \nu) \left[m'_1 \cdot s - e^{-\mu_n^2 t_\Phi} t_\Phi \frac{d\mu_n^2}{dBi} \cdot z \right]}{z^2}; \quad (30)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi} = \frac{2u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G J_0(\eta_n(Bi)) s - \bar{F}_{bln}(\eta_n(Bi), \nu) \cdot \left[m'_2 \cdot s - e^{-\mu_n^2 t_\Phi} t_\Phi \frac{d\mu_n^2}{dBi} z^2 \right]}{z^2 \cdot J_0^2(\eta_n(Bi))}. \quad (31)$$

Здесь

$$G = \frac{\partial \bar{F}_{bln}(\eta_n(Bi), \nu)}{\partial Bi} z; \quad z = (\eta_n^2(Bi) + Bi^2) J_0(\eta_n(Bi)); \quad s = \left(1 - e^{-\mu_n^2 t_\Phi}\right);$$

$$\frac{d\mu_n^2}{dBi} = \frac{2a}{R^2} \eta_n(Bi) \frac{d\eta_n}{dBi}; \quad \frac{\partial \bar{F}_{bln}(\eta_n(Bi), \nu)}{\partial Bi} = \int_0^1 F_{bl}(l, \nu) (-l^2) J_1(\eta_n(Bi)l) \frac{d\eta_n}{dBi} dl;$$

$$m'_1 = 2J_0(\eta_n(Bi)) \left(Bi + \eta_n(Bi) \frac{\partial \eta_n(Bi)}{\partial Bi} \right) - J_1(\eta_n(Bi)) \frac{\partial \eta_n(Bi)}{\partial Bi} (\eta_n^2(Bi) + Bi^2),$$

$$m'_2 = 2J_0^2(\eta_n(Bi)) \left(\eta_n(Bi) \frac{\partial \eta_n(Bi)}{\partial Bi} + Bi \right) - z \left[2J_1(\eta_n(Bi)) \frac{\partial \eta_n(Bi)}{\partial Bi} \right].$$

Определим теперь коэффициенты передачи α_{mj} в (20). Согласно (19), (29) – (31) получаем следующие выражения:

$$\alpha_{11} = \frac{\partial \tilde{y}^{(1)}}{\partial \bar{\theta}_1} = -\frac{1}{J} \begin{vmatrix} \frac{\partial g_1^*}{\partial \bar{\theta}_1} & \frac{\partial g_1}{\partial \tilde{y}^{(2)}} \\ \frac{\partial g_2^*}{\partial \bar{\theta}_1} & \frac{\partial g_2}{\partial \tilde{y}^{(2)}} \end{vmatrix} = \frac{1}{J} \frac{\partial g_2}{\partial \tilde{y}^{(2)}} = 1 - \frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{M_1}{N_1}; \quad (32)$$

здесь

$$M_1 = s \left[G J_0(\eta_n(Bi)) - \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), \nu) \cdot m'_2 \right] - \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), \nu) J_0(\eta_n(Bi)) \frac{d\mu_n^2}{dBi} z e^{-\mu_n^2 t_\Phi} t_\Phi;$$

$$N_1 = s \left(G - \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), \nu) \cdot m'_1 \right) J_0^2(\eta_n(Bi)) - \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), \nu) \frac{d\mu_n^2}{dBi} z e^{-\mu_n^2 t_\Phi} t_\Phi J_0^2(\eta_n(Bi));$$

$$\alpha_{12} = \frac{\partial \tilde{y}^{(1)}}{\partial \bar{\theta}_2} = -\frac{1}{J} \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1^*}{\partial \bar{\theta}_2} & \frac{\partial g_1}{\partial \tilde{y}^{(2)}} \\ \frac{\partial g_2^*}{\partial \bar{\theta}_2} & \frac{\partial g_2}{\partial \tilde{y}^{(2)}} \end{bmatrix} = \frac{1}{J} \frac{\partial g_1}{\partial \tilde{y}^{(2)}} = 1 - \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial \bar{\theta}_2} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{M_2}{N_2}, \quad (33)$$

здесь

$$M_2 = s \left[G - \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), \nu) \cdot m'_1 \right] J_0^2(\eta_n(Bi)) - \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), \nu) J_0^2(\eta_n(Bi)) \frac{d\mu_n^2}{dBi} z e^{-\mu_n^2 t_\Phi} t_\Phi;$$

$$N_2 = s \left(G J_0(\eta_n(Bi)) - \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), \nu) \cdot m'_2 \right) - \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), \nu) e^{-\mu_n^2 t_\Phi} t_\Phi J_0(\eta_n(Bi)) z \frac{d\mu_n^2}{dBi};$$

$$\alpha_{21} = \frac{\partial \tilde{y}^{(2)}}{\partial \bar{\theta}_1} = -\frac{1}{J} \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial \tilde{y}^{(1)}} & \frac{\partial g_1^*}{\partial \bar{\theta}_1} \\ \frac{\partial g_2}{\partial \tilde{y}^{(1)}} & \frac{\partial g_2^*}{\partial \bar{\theta}_1} \end{bmatrix} = -\frac{1}{J} \frac{\partial g_2}{\partial \tilde{y}^{(1)}} = -\frac{1}{\frac{\partial \bar{\theta}_2}{\partial Bi} - \frac{\partial \bar{\theta}_1}{\partial Bi}} = -\frac{\lambda}{2u_{\max} R^2} \times$$

$$\times \frac{1}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{N_3 + N_4}{z^2 \cdot J_0^2(\eta_n(Bi))}};$$

здесь

$$N_3 = s \left[G \left(1 - J_0(\eta_n(Bi)) \right) J_0(\eta_n(Bi)) - \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), \nu) \left(m'_2 - m'_1 \cdot J_0(\eta_n(Bi)) \right) \right];$$

$$N_4 = \bar{F}_{b1n}(\eta_n(Bi), \nu) e^{-\mu_n^2 t_\Phi} t_\Phi \frac{d\mu_n^2}{dBi} z \left[J_0(\eta_n(Bi)) - 1 \right] J_0(\eta_n(Bi))$$

$$\alpha_{22} = \frac{\partial \tilde{y}^{(2)}}{\partial \bar{\theta}_2} = -\frac{\partial \tilde{y}^{(2)}}{\partial \bar{\theta}_1} = \frac{1}{\frac{2u_{\max} R^2}{\lambda} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{N_3 + N_4}{z^2 \cdot J_0^2(\eta_n(Bi))}}. \quad (35)$$

Все производные в (30) – (35) рассчитываются в номинальной точке $y_H = (\theta_0^*, Bi^*)$ по зависимостям (27), (28).

Найти аналитические выражения для коэффициентов β_{mi} и β_{mi}^* в (22), (23) не представляется возможным ввиду их сложной и неявной зависимости от параметров θ_0, Bi . Значения этих коэффициентов приближенно вычисляются для конкретных исходных данных процесса индукционного нагрева как приращение значения функции к приращению ее аргумента:

$$\beta_{mi} = \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial \tilde{y}^{(m)}} \right)_{\tilde{y}=y_H} \cong \frac{\Delta \rho_i}{\Delta \tilde{y}^{(m)}}; \quad m = 1, 2; \quad (36)$$

$$\beta_{mi}^* = \left(\frac{\partial \theta_i^T}{\partial \tilde{y}^{(m)}} \right)_{\tilde{y}=y_H} \cong \frac{\Delta \theta_i^T}{\Delta \tilde{y}^{(m)}}; m=1,2 \quad (37)$$

при достаточно малых значениях $\Delta \tilde{y}^{(m)}$.

Линейные приближения алгоритма идентификации (20) по результатам неполного наблюдения примут вид

$$\tilde{y}^{(m)} = \tilde{y}_H^{(m)} + \sum_{j=1}^2 \alpha_{mj} (\bar{\theta}_j(t_\Phi) - \bar{\theta}_{jH}); \alpha_{mj} = \left(\frac{\partial \tilde{y}^{(m)}}{\partial \theta_j} \right)_{\tilde{y}=y_H}; m=1,2. \quad (38)$$

Линейные приближения алгоритма автоматической коррекции коэффициентов обратных связей и заданных распределений температурного поля $\theta_j^T(\tilde{y})$ в структуре функции переключения по результатам неполного наблюдения с учетом (22), (23) определяются по выражениям:

$$\rho_i(\tilde{y}) = \rho_i(y_H) + \sum_{j=1}^2 \gamma_{ij} (\bar{\theta}_j(t_\Phi) - \bar{\theta}_{jH}); i=1,2; \quad (39)$$

$$\gamma_{ij} = \sum_{m=1}^2 \alpha_{mj} \beta_{mi}; \beta_{mi} = \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial \tilde{y}^{(m)}} \right)_{\tilde{y}=y_H};$$

$$\theta_i^T(\tilde{y}) = \theta_i^T(y_H) + \sum_{j=1}^2 \gamma_{ij}^* (\bar{\theta}_j(t_\Phi) - \bar{\theta}_{jH}); i=1,2; \quad (40)$$

$$\gamma_{ij}^* = \sum_{m=1}^2 \alpha_{mj} \beta_{mi}^*; \beta_{mi}^* = \left(\frac{\partial \theta_i^T}{\partial \tilde{y}^{(m)}} \right)_{\tilde{y}=y_H}.$$

Здесь $\bar{\theta}_{jH}, j=1,2$ находится по (27), (28) в окрестности номинальной точки $y_H = (\theta_0^*, Bi^*)$.

Для исходных номинальных данных $v=5; Bi=0,04; \theta^{**}=460^\circ\text{C}; R=0,08\text{ м}; \frac{\theta_0 - \theta^{**}}{P_{\max} R^2 / \lambda} = -2,0; \lambda = 130 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}; P_{\max} = 1,625 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}$ получены следующие значения коэффициентов в (38) – (40):

$$\alpha_{11} = -0,019; \alpha_{12} = 0,019; \alpha_{21} = 27,105; \alpha_{22} = -27,105;$$

$$\beta_{11} = \beta_{21} = 0; \beta_{12} = -0,11; \beta_{22} = 5,5;$$

$$\gamma_{11} = \gamma_{12} = 0; \gamma_{21} = 149,082; \gamma_{22} = -149,082;$$

$$\gamma_{11}^* = -57,445; \gamma_{12}^* = 57,445; \gamma_{21}^* = -59,814; \gamma_{22}^* = 59,814.$$

Алгоритм оптимального по быстродействию управления в рассматриваемых условиях интервальной неопределенности величин θ_0 и Bi принимает теперь следующий вид вместо (25):

$$u^* = \frac{u_{\max}}{2} \left[1 + \text{sign} \left(\theta_1^T(\tilde{y}) - \theta(R, t) + \rho_2(\tilde{y}) \left(\theta_2^T(\tilde{y}) - \theta(0, t) \right) \right) \right]. \quad (41)$$

Соответствующая структура замкнутой системы с обратными связями приведена на рис. 2.

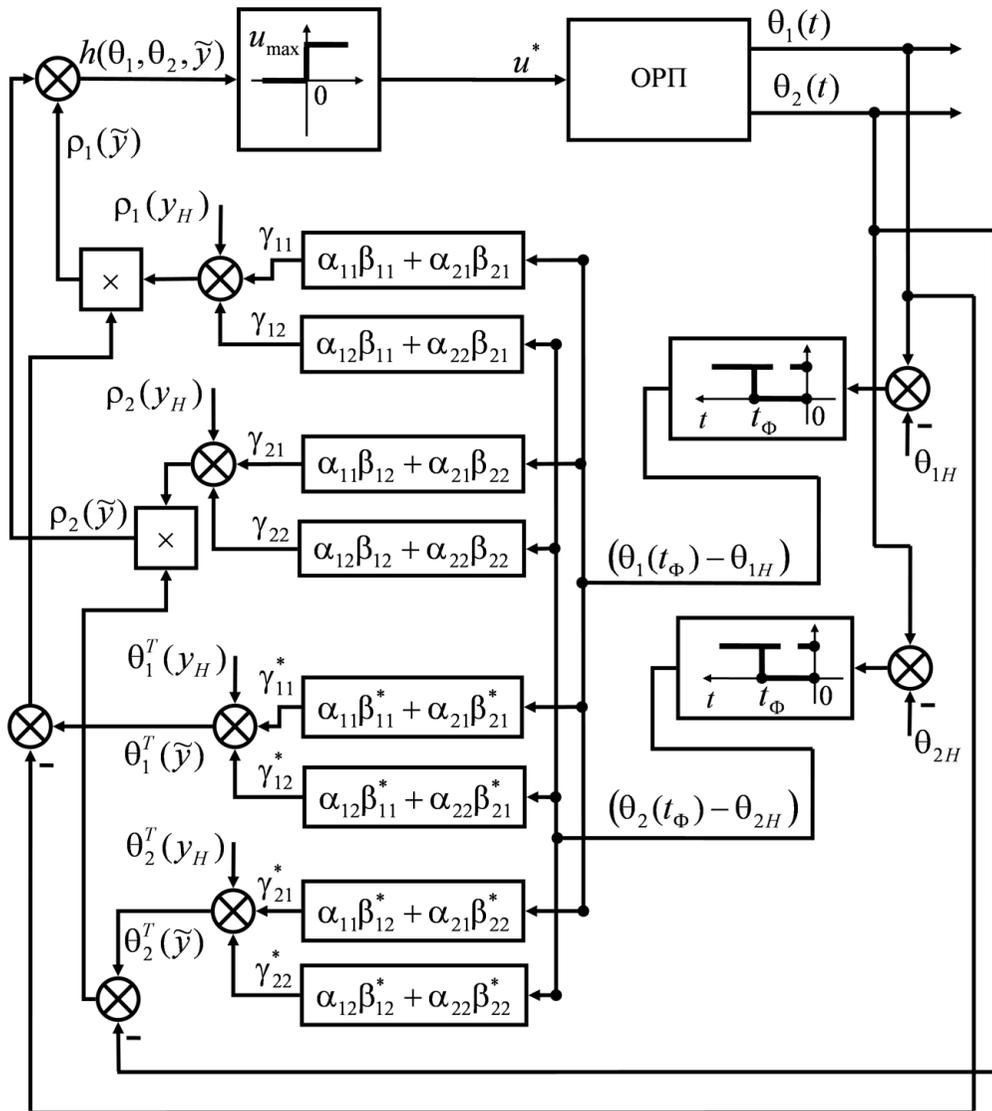


Рис. 2. Структура оптимальной по быстродействию системы управления процессом индукционного нагрева заготовки под обработку давлением с неполным измерением состояния в условиях интервальной неопределенности

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rapoport E., Pleshivtseva Yu. Optimal Control of Induction Heating Processes. – CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, London, New York, 2007.
2. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами. – М.: Высшая школа, 2009. – 677 с.
3. Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление динамическими системами с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Тр. XIV Международной конференции. – Самара: СНЦ РАН, 2012. – С. 75-86.
4. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 1. – М.: Физматлит, 1962. – 608 с.

Статья поступила в редакцию 3 октября 2012 г.

SYNTHESIS OF TIME-OPTIMAL CONTROL SYSTEM OF THE INDUCTION HEATING PROCESSES WITH INTERVAL OF UNCERTAINTY CHARACTERISTICS OF THE OBJECT

I.S. Levin, E.Ya. Rapoport

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The problem of optimal time control systems synthesis with interval of incompletely characteristics of the object models with distributed parameters is considered. Synthesis of optimal controller of induction heating process was performed and structure identifier parameters of characteristic control object was proposed.

Keywords: *distributed parameter system, induction heating, control with interval uncertainty of characteristics of the object, the synthesis of optimal control.*

*Ilya S. Levin, Graduate student.
Edgar Ya. Rapoport (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ УРБАНИЗИРОВАННОЙ ТЕРРИТОРИИ

Т.И. Михеева, О.В. Сапрыкина

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34
E-mail: ssau@ssau.ru

Приводятся объектно-ориентированные модели, описывающие основные понятия предметной области «Организация дорожного движения и перевозок», такие как улично-дорожная сеть города, транспортный поток, управление транспортным потоком. На данных моделях строится интеллектуальная транспортная система.

Ключевые слова: *объектно ориентированная модель, матрица корреспонденций, вырожденная модель эволюционного развития сети, топологические изменения сети, планограмма.*

Давний интерес к пространственной структуре транспортных сетей основан на значительном воздействии структуры сети на анатомию глобального функционирования всей инфраструктуры урбанизированной территории. Одним из значимых показателей комфорта современного города является наличие системы транспортных сетей, способствующих передвижению населения. На данный момент существуют многочисленные методы моделирования развития транспортных сетей. Однако большинство из них не столь эффективны и не дают существенных результатов. Приводится вырожденная модель эволюционного развития сети урбанизированной территории, позволяющая формировать сеть оптимальной топологии на основе заданного каркаса и матриц корреспонденций путем укрепления более ценных связей и удаления менее значимых. Данная модель представляет собой наблюдаемый на практике процесс роста сети, в которой наиболее используемые связи укрепляются и в конечном итоге преобразуются в магистрали, шоссе или автострады, в то время как менее используемые ослабляются и со временем удаляются из модели.

Вырожденная модель эволюционного развития сети представляет собой итерационный процесс роста сети за дискретное время T . В каждый период t_i осуществляются топологические изменения транспортной сети. Процесс повторяется до получения уравновешенной модели. В качестве входных параметров модели используются матрицы корреспонденций $M_{t_k}^r$, M_{t_k} и заданный вид двухмерной сетки.

На начальном этапе построения модели регулярная двухмерная сетка накладывается на точечную адресную планограмму распределения народонаселения урбанизированной территории и служит каркасом будущей транспортной сети. Линии сетки являются прообразом связей, а их пересечения – узлами. Большинство населенных пунктов имеют сложную конфигурацию поверхностной транспортной инфраструктуры, однако для подавляющего множества транспортных узлов города движение можно осуществить в одном из четырех направлений, то есть поворот от каждо-

Татьяна Ивановна Михеева (д.т.н., профессор), профессор кафедры «Организация и управление перевозками на транспорте».

Ольга Валерьевна Сапрыкина, аспирант.

го узла можно сделать либо на 90° , либо на число, кратное 90° . Таким образом, на улично-дорожную сеть урбанизированной территории накладывается прямоугольная сетка (рис. 1, а). Однако на подобной сетке не всегда можно смоделировать оптимальную улично-дорожную сеть. Для лучшего приближения по критериям оптимальности к искомой топологии сети резоннее использовать полносвязную (рис. 1, б) или шестиугольную (рис. 1, в) сетку. При этом стоит заметить, что чем большее число направлений окажется доступным из исходного узла, тем короче будет расстояние между исходным и конечным узлами. Такая сеть становится избыточной и значительно «утяжеляет» модель. В шестиугольной сетке угол пересекающихся в узле связей равен или кратен 30° , полносвязная представляет собой сетку, в которой соединена каждая пара исходных узлов.

Матрицы корреспонденций $M_{t_k}^{r_j}$, M_{t_k} формируются с учетом дня недели и времени суток. Выделим следующие виды матриц.

1. Матрица рабочего дня M_{t_k} , снятая в t_k -период, где t_k определяет рабочий день с понедельника по пятницу ($k=\overline{1,5}$) в промежутках времени вне часов пик $t_k^{r_j}$ ($j=\overline{0,24}$).

2. Матрица рабочего дня $M_{t_k}^{r_j}$, снятая в t_k -период, где t_k определяет рабочий день с понедельника по пятницу ($k=\overline{1,5}$) в промежутках времени в часы пик $t_k^{r_j}$ ($j=\overline{0,24}$).

3. Матрица рабочего дня $M_{t_5}^{r_j}$, снятая в t_k -период, где t_k определяет рабочий день (пятница) ($k=5$) в промежутках времени вечернего часа пик $t_k^{r_j}$ ($j=\overline{17,22}$).

4. Матрица выходного дня M_{t_k} , снятая в t_k -период, где t_k определяет выходной день (суббота или воскресенье) ($k=\overline{6,7}$) в промежутках времени вне часов пик $t_k^{r_j}$ ($j=\overline{0,24}$).

5. Матрица выходного дня $M_{t_k}^{r_j}$, снятая в t_k -период, где t_k определяет выходной день (суббота или воскресенье) ($k=\overline{6,7}$) в промежутках времени в утренний час пик субботы $t_6^{r_j}$ ($j=\overline{7,10}$) или вечерний час пик воскресенье $t_7^{r_j}$ ($j=\overline{17,22}$).

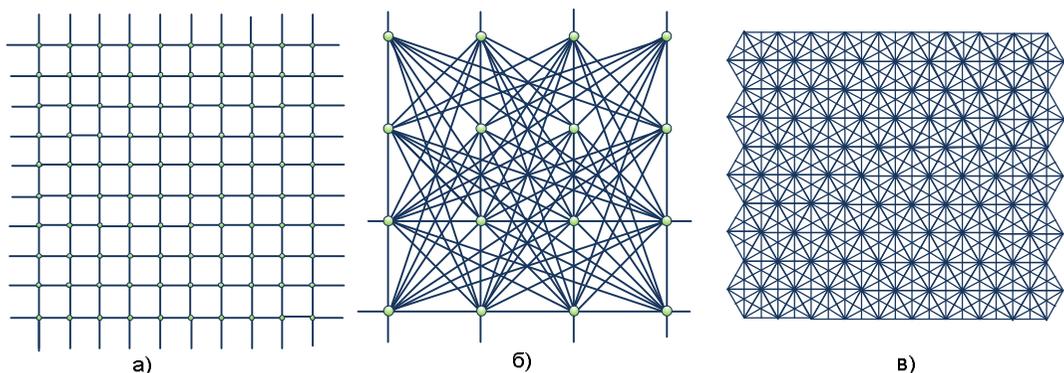


Рис. 1. Прямоугольная (а), полносвязная (б) и шестиугольная (в) сетки

Матрицы корреспонденций $M_{t_k}^{r_j}$, M_{t_k} , подающиеся в качестве входных параметров модели, являются совокупностью вышеописанных типов матриц в следующих пропорциях:

$$M = 5 \cdot (c_1 \cdot M_{t_k} + c_2 \cdot M_{t_k}^{r_j}) + c_3 \cdot M_{t_s}^{r_j} + 2 \cdot (c_4 \cdot M_{t_k} + c_5 \cdot M_{t_k}^{r_j}), \quad (1)$$

где c_i – коэффициент процентного отношения частоты возникновения i -го типа матрицы корреспонденции от общего количества матриц за неделю.

Эволюционный процесс роста транспортной сети основан на модели активного интеллектуального объекта – агента. Агенты распределены по заданной двумерной сетке согласно матрице корреспонденции. Первоначально транспортная сеть представляет собой полностью заданную двумерную сетку – каркас. Передвигаясь по каркасу согласно назначенным правилам (интеллектуальной функции), каждый агент динамически моделирует свою траекторию движения. При запуске итерационного алгоритма вырожденной модели эволюционного роста сети для всех интеллектуальных объектов по количеству заданных матриц корреспонденции на каждой новой итерации происходит укрепление или ослабление связей первоначального каркаса. Когда при очередном временном цикле произведенная модификация топологии сети будет незначительна, то есть модель сети станет устойчивой, процесс формирования топологии сети будет закончен.

Алгоритм движения активного интеллектуального объекта по сети запускается для каждого агента и включает три шага: поиск кратчайшего пути, вычисление обобщенной стоимости связей и оценку стоимости доступа.

Шаг 1. Поиск кратчайшего пути. С помощью алгоритма Дейкстры определяются минимальные расстояния от текущего узла до всех остальных узлов сети. Найденная траектория представляет собой набор последовательных связей a вдоль минимального пути по сетке.

Шаг 2. Для каждой связи a , принадлежащей найденной минимальной траектории, вычисляется обобщенная стоимость s_a^t в период времени t . Обобщенная стоимость вычисляется как линейная комбинация стоимости времени и денежной стоимости:

$$s_a^t = \frac{\eta^{l_a}}{v_a^t} + \tau (l_a)^{\rho_1} (f_a^t)^{\rho_2} (v_a^t)^{\rho_3}, \forall a \in \{A^t\}, \quad (2)$$

где η – значение времени; l_a – длина связи a ; f – средний объем потока; v – средняя скорость связи a в периоде времени t . Коэффициенты обозначают: τ – норма потерь, ρ_1 , ρ_2 , и ρ_3 – коэффициент длины, коэффициент потока и коэффициент скорости соответственно.

Шаг 3. Для оценки стоимости доступа рассмотрим минимальную траекторию от исходного узла R до узла назначения S , которую обозначим как T_{RS} . Предположим, что m ячеек сетки r_1, r_2, r_m присоединены к узлу R и n ячеек сетки s_1, s_2, s_n присоединены к узлу S . Тогда стоимость доступа от исходного узла R к узлу назначения S вдоль самого короткого пути для итерации i может быть вычислена как

$$T_{RS}^i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{\eta d_{rj}}{v_0} \right) + \sum_a t_a^i q_{a,RS}^i + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\eta d_{sk}}{v_0} \right). \quad (3)$$

Первое слагаемое (1) уравнения вычисляет среднюю стоимость доступа, идущую от ячеек, прикрепленных к узлу R . Переменная d_{rj} представляет расстояние от ячейки rj к узлу R . Переменная v_0 является минимальной скоростью, которая может интерпретироваться как скорость шага для того, чтобы получить доступ к самым близким узлам сетки. Точно так же третье слагаемое (1) вычисляет среднюю стоимость доступа от узла S к ячейкам, привязанным к нему. Вторая часть суммирует обобщенную стоимость связей в T_{RS} , где $q_{a,RS}^i$ – фиктивная переменная, которая равна 1, если связь принадлежит T_{RS} , и 0 иначе. Общая схема вырожденной модели эволюционного развития улично-дорожной сети урбанизированной территории представлена на рис. 2.

Для определения эффективности полученной транспортной сети используются пространственные величины, среди которых – соединяемость, разнородность, плотность и геометрические шаблоны связи.

Критерий соединяемости транспортной сети был введен в 1960-х гг. для графоаналитических измерений анализа сети. Критерий включает четыре элементарных графоаналитических индекса – *альфа-индекс*, *бета-индекс*, *гамма-индекс* и *цикломатическое число*. Цикломатическое число указывает число кругооборотов в сети. Альфа-индекс – отношение между фактическим числом кругооборотов в сети и максимальным числом кругооборотов. Бета-индекс – отношение между числом связей и числом узлов. Гамма-индекс сравнивает фактическое число связей с максимальным числом возможных связей в сети.

Три индекса используются для оценки связей в сети, их значения колеблются в диапазоне от 0 до 1, причем более высокое значение указывает на большую связь сети. Гамма-индекс вычисляется следующим образом:

$$\gamma = \frac{e}{3(v-2)}, \quad (4)$$

где e – число дуг (направленные связи), v – число вершин (узлы).

Еще одной графоаналитической величиной является плотность сети D , которая измеряет длину связей на единицу поверхности. Величина D прямо пропорциональна развитию сети. Плотность сети измеряется длиной связей L к области территории B :

$$D = \frac{L}{B}. \quad (5)$$

В последние годы в исследовании сетей используются крупномасштабные статистические свойства сложных сетей, такие как иерархия и степень узлов. Степень узла предопределяет его значимость. Не всегда эти величины могут использоваться для транспортных сетей, поэтому вводится понятие энтропии как указателя на иерархический атрибут связи в транспортной сети. Связи транспортной сети могут быть сгруппированы в подмножества, основанные на различных атрибутах связи, таких как скорость, функциональный тип, объем перевозок или срок службы. Пропорция каждого подмножества вычислена как частота связей в этом подмножестве к общему количеству связей. Затем пропорции собраны вместе по величине энтропии.

Например, величина по энтропии H относительно скоростей связи определена как

$$\gamma = -\sum_{k=1}^{\infty} p_k \log_2(p_k), \quad (6)$$

где p_k – пропорция связей на k -уровне относительно общего количества существующих связей. Связи упорядочены в гистограмму по скоростям. Связи, скорость которых попадает в диапазон $[k-1, k]$, отнесены к k -уровню.

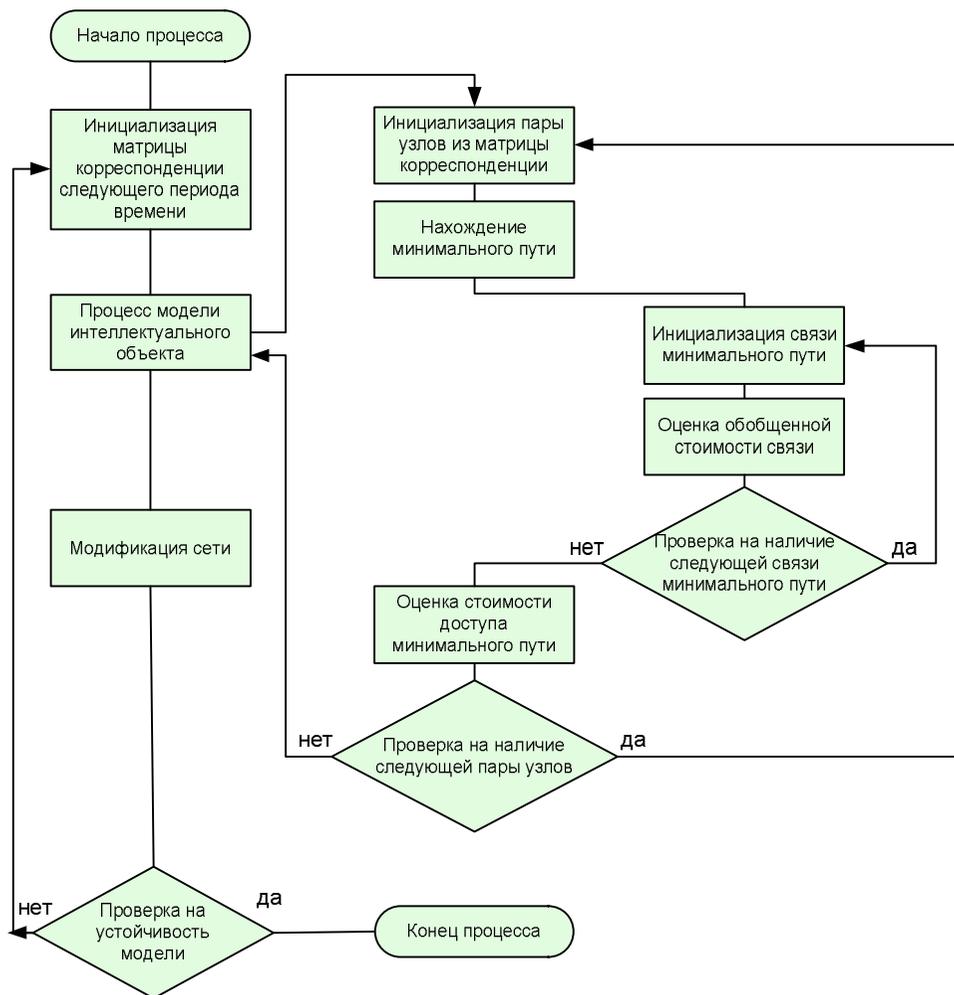


Рис. 2. Схема алгоритма моделирования эволюционного роста улично-дорожной сети

Еще одним важным индикатором транспортной системы является так называемый индекс $Gini$ (G), используемый для определения плотности транспортных потоков вдоль связей в сети. Важность связей может быть охарактеризована числом транспортных средств или пассажиров, которые проходят через нее в пределах некоторого временного интервала. Связь измеряется в километрах, и ее фактическое использование определяется ежедневными поездками транспортного средства q_v или пассажирскими поездками q_p . Индекс G для q_v или G для q_p распределения на сети в дискретной форме определяется следующим образом:

$$G = 1 - \sum_{k=1}^K (x_k - x_{k-1})(y_k + y_{k+1}), \quad (7)$$

где x_k представляет собой суммарную часть связей для $k = 0, 1, \dots, K$, в то время как y_k представляет суммарную часть общего q_v или q_p . Связи отсортированы в порядке возрастания согласно q_v или q_p , которые получены на связях.

Для отображения использования городской территории и транспортной инфраструктуры на основе пространственных паттернов кластеризации значимыми являются величины момента инерции распределения рабочих мест I и эквивалентный радиус r . Момент инерции распределения рабочих мест в городской области вычисляется как

$$I = \sum_{k=1}^n j_k d_k^2, \quad (8)$$

где j_k представляет занятость зоны k , d_k – расстояние между центром тяготения k -й зоны и центром городской территории.

Эквивалентный радиус вычисляется как

$$r = \sqrt{\frac{I}{\sum_k j_k}} \quad (9)$$

и по сути отображает, насколько далеко распространена «занятость населения» от центра городской территории. Нулевое значение радиуса указывает, что все население занято в центре области, в то время как большой радиус указывает, что занятость расположена далеко от центра.

Для определения и идентификации типичных геометрических паттернов, присущих транспортным сетям, разработан теоретический графовый алгоритм и предложены количественные меры для оценки относительного значения каждого типа связи. Значение предопределенных структурных элементов транспортной сети, таких как кольцо, сеть, цикл и ветвь, определено и оценено следующими уравнениями:

$$\phi_{ring} = \frac{\sum_i (l_i \delta_i^{ring})}{\sum_i l_i}, \quad (10)$$

где l_i – длина индивидуальной связи i ; δ_i^{ring} равно 1, когда связь принадлежит кольцу; аналогично

$$\phi_{web} = \frac{\sum_i (l_i \delta_i^{web})}{\sum_i l_i}. \quad (11)$$

Отметим, что если связь принадлежит одному и только одному циклу, то она принадлежит кольцу; если она расположена более чем в одном цикле, то она принадлежит сети. Если связь принадлежит сети или кольцу, она определена как связь цикла, в противном случае она определяется как связь ветки, следовательно

$$\phi_{circuit} = \phi_{ring} + \phi_{web}; \quad (12)$$

$$\phi_{tree} = 1 - \phi_{ring} - \phi_{web} \cdot \quad (13)$$

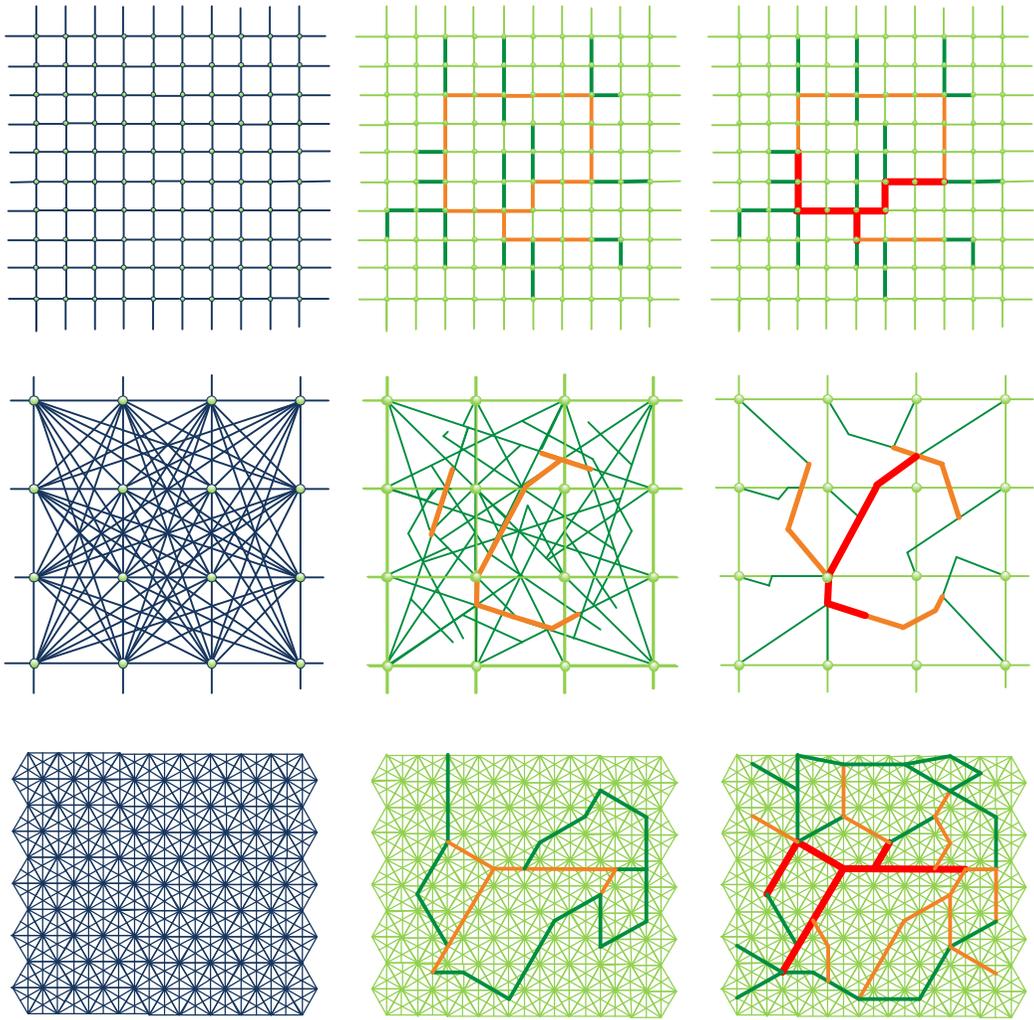


Рис. 3. Вырожденная модель эволюционного роста сети на различных каркасах

На рис. 3 приведены примеры работы предложенной вырожденной модели эволюционного роста сети. На основе прямоугольной, полносвязной и шестиугольной сеток малого масштаба проводится динамическое моделирование топологии транспортной сети. Получившиеся итоговые связи классифицируются в пять уровней согласно трафику. Для оценки эффективности полученной топологии сети используются описанные критерии оценки – плотность сети, гамма-индекс, энтропия сети, индекс G , величина иерархии. Для уменьшения вычислительной сложности алгоритма рекомендуется вычислять данные критерии через каждые пять итераций.

Внедрение описанной модели в разработку интеллектуальной транспортной системы г. Самары в качестве одного из возможных вариантов решения задачи оптимизации улично-дорожной сети будет способствовать более рациональной организации дорожного движения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Black W.* An Iterative Model for Generating Transportation Networks / *Geographical Analysis*. V. 3, 1971. P. 283–288.
2. *Levinson D., Yerra B.* Self-Organization of Surface Transportation Networks / *Transportation Science*. V. 40, 2006. P. 179–188.
3. *Михеева Т.И.* Построение математических моделей объектов улично-дорожной сети города с использованием геоинформационных технологий // *Информационные технологии*. – 2006. – №1. – С. 69-75.
4. *Михеева Т.И., Демьяненко Р.В., Большаков А.С.* Обобщенный метод проектирования модели улично-дорожной сети // *Математика. Компьютер. Образование: Тезисы докладов XIII международной конф.* – М.-Ижевск: МГУ, НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2006. – С. 78.
5. *Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р.* Алгоритмы: построение и анализ. – М.: МЦНМО, 2001. – 960 с.
6. *Михеева Т.И., Петряшина Ю.В.* Алгоритмы триангуляции плоских областей по нерегулярным сетям точек // *Перспективные информационные технологии в научных исследованиях, проектировании и обучении (ПИТ-2006): Труды научно-техн. конф. с межд. участ. Т. 2.* – Самара, 2006. – С. 48-54.

Статья поступила в редакцию 6 июня 2012 г.

TRANSPORT NETWORK EVOLUTION MODEL OF THE URBAN AREA

T.I. Micheeva, O.V. Saprykina

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University)
34, Moskovskoye sh., Samara, 443086

The object-oriented models describing basic concepts of a subject domain «Organization of road traffic», such as a street-road network of city, transport stream, control of a transport stream are introduced. The above taxonomic models are used to set up a computer aided traffic control system.

Keywords: *object-oriented model, the matrix of correspondence, the degenerate model of the evolutionary development of the network, topological changes in the network, planogram.*

УПРАВЛЕНИЕ РАЗМЕЩЕНИЕМ СЫРЬЯ НА ПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ

А.И. Пугачев

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрены проблемы обеспечения максимальной переработки сырья, связанные с его предварительным размещением на этапе заготовки. Теоретически обоснована стратегия рационального размещения поступающих партий сырья в системе хранения предприятия. Предложена основанная на этой стратегии методика оптимального выбора звеньев хранения для размещения каждой поступающей партии.

Ключевые слова: партия сырья, показатели качества, звенья хранения, распределение ресурсов.

Определяющая роль сырья и его качественных показателей является главной специфической чертой перерабатывающих предприятий. В условиях, когда параметры качества поступающих партий сырья отличаются друг от друга, сырье базисного качества, требуемого для производства, получают путем смешивания сырья из разных партий [1, 2]. С этой целью в процессе заготовки сырье с разными показателями качества размещают в разных звеньях системы хранения. Число звеньев всегда ограничено, что заставляет размещать в каждом звене сырье из нескольких исходных партий с разным составом показателей качества. Это приводит к естественному смешиванию сырья с усреднением его показателей качества. Если в процессе заготовки размещение сырья не контролировать, то в дальнейшем возможности получения производственных партий сырья базисного качества в виде смесей из нескольких звеньев хранения могут оказаться сильно ограниченными [3]. Критерием же рационального размещения поступающей партии является возможность получения из имеющихся запасов максимума сырьевой смеси базисного качества.

В данной статье теоретически обосновывается стратегия размещения поступающих партий сырья в соответствии с данным критерием в системе хранения предприятия, а также предлагается методика оптимального выбора звеньев хранения для размещения каждой поступающей партии.

Решение указанной проблемы актуально даже при переработке однопараметрического сырья. Поэтому сначала исследуем влияние размещения партий на данный критерий на примере сырья с одним показателем качества. В этом случае всякая партия r характеризуется количеством b сырья и показателем p качества. Пусть в системе хранения имеется n элементов хранения, в которых размещены n партий сырья одного вида. Обозначим общие запасы сырья как $R = (r_i)$, $i = 1, \dots, n$, где $r_i = (b_i, p_i)$.

При этом $b_s = \sum_{i=1}^n b_i$ – суммарное количество сырья, а $p_c = \frac{1}{b_s} \sum_{i=1}^n p_i b_i$ – среднее значение показателя качества в системе.

Не снижая общности исследования множество $\{(b_i, p_i) | i = 1, \dots, n\}$ для удобства анализа всегда можно упорядочить по возрастанию p_i , т. е.

$$\{(b_i, p_i) \mid p_{i+1} \geq p_i, i=1, \dots, n\}. \quad (1)$$

В качестве распределяемого ресурса, характеризующего количество и качество запасов, рассмотрим величину $p_c b_s = \sum_{i=1}^n p_i b_i$.

Исследуем влияние закона изменения показателя $p(x)$ качества на максимальный объем сырья с базисным качеством в идеальной системе хранения, в которой ресурс $p_c b_s$, на интервале $\overline{0, b_s}$ распределен непрерывно. Для начала рассмотрим простейший линейный закон

$$p(x) = p_l + kx, \quad (2)$$

где p_l – наименьшее из возможных значений p . Функция $r(x)$, характеризующая изменение распределяемого ресурса на $\overline{0, b_s}$, в этом случае будет иметь вид

$$r(x) = \int_0^{b_s} p(x) dx = \int_0^{b_s} (p_l + kx) dx = p_l b_s + \frac{1}{2} k b_s^2. \quad (3)$$

Поскольку $r(b_s) = p_c b_s$, то

$$p_l b_s + \frac{1}{2} k b_s^2 = p_c b_s. \quad (4)$$

Отсюда $k = \frac{2(p_c - p_l)}{b_s}$, а функция $r(x)$ будет иметь вид

$$r(x) = p_l x + \frac{p_c - p_l}{b_s} x^2. \quad (5)$$

Обозначим через b_e максимальное количество смеси с базисным (требуемым для переработки) значением e показателя качества, которое можно получить из имеющихся запасов. Приравнявая $r(b_e) = e b_e$, получим

$$p_l b_e + \frac{p_c - p_l}{b_s} b_e^2 = e b_e. \quad (6)$$

Решением данного уравнения, удовлетворяющим условиям задачи, будет

$$b_e = \frac{b_s (e - p_l)}{(p_c - p_l)}, \text{ при } 0 < b_e \leq b_s. \quad (7)$$

Решение (7) иллюстрирует график на рис. 1.

Подставив b_e из (7) в условие $b_e \leq b_s$, получим $\frac{e - p_l}{p_c - p_l} \leq 1$, откуда следует, что

для рассматриваемых исходных данных необходимым условием возможности формирования смеси с показателем качества e будет $p_c \geq e$. В противном случае из имеющихся запасов получить смесь с показателем качества e невозможно.

Последний вывод связан не только с качеством запасов сырья, но и с выбранным линейно-возрастающим законом его изменения, при котором в смесь включаются ресурсы начиная с наименьшего показателя качества. Поэтому рассмотрим второй вариант решения задачи, выбрав в качестве $p(x)$ вместо (2) линейно-убывающую

функцию

$$p(x) = p_h - kx, \quad (8)$$

где p_h – наибольшее из возможных значений p . Тогда

$$r(x) = \int_0^x p(x) dx = \int_0^x (p_h - kx) dx = p_h x - \frac{1}{2} kx^2. \quad (9)$$

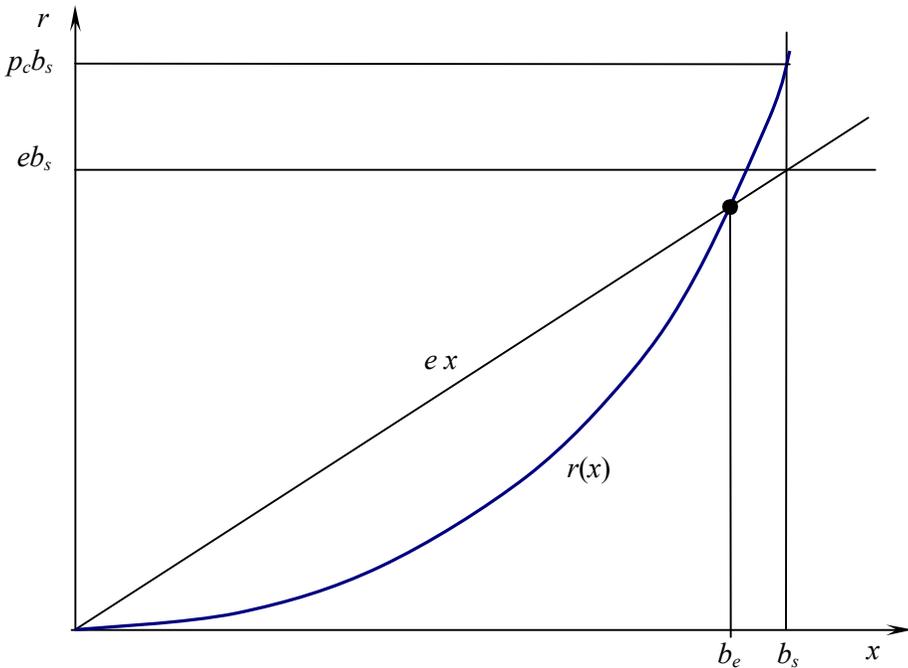


Рис. 1. Непрерывное распределение ресурса $r(x)$ при линейно возрастающей функции $p(x)$

Из условия $r(b_s) = p_c b_s$ имеем $k = \frac{2(p_h - p_c)}{b_s}$. Тогда

$$r(x) = p_h x + \frac{p_c - p_h}{b_s} x^2. \quad (10)$$

Приравнявая $r(b_e) = e b_e$, получим

$$b_e = \frac{b_s(p_h - e)}{(p_h - p_c)} \text{ при } 0 < x \leq b_s. \quad (11)$$

Решение (9) иллюстрирует график на рис. 2.

Аналогично вышеизложенному необходимым условием существования допустимого решения (11) будет неравенство $\frac{p_h - e}{p_h - p_c} \leq 1$ или $p_c \leq e$. Таким образом, при $p_c \leq e$ для решения задачи следует использовать убывающую функцию $p(x)$.

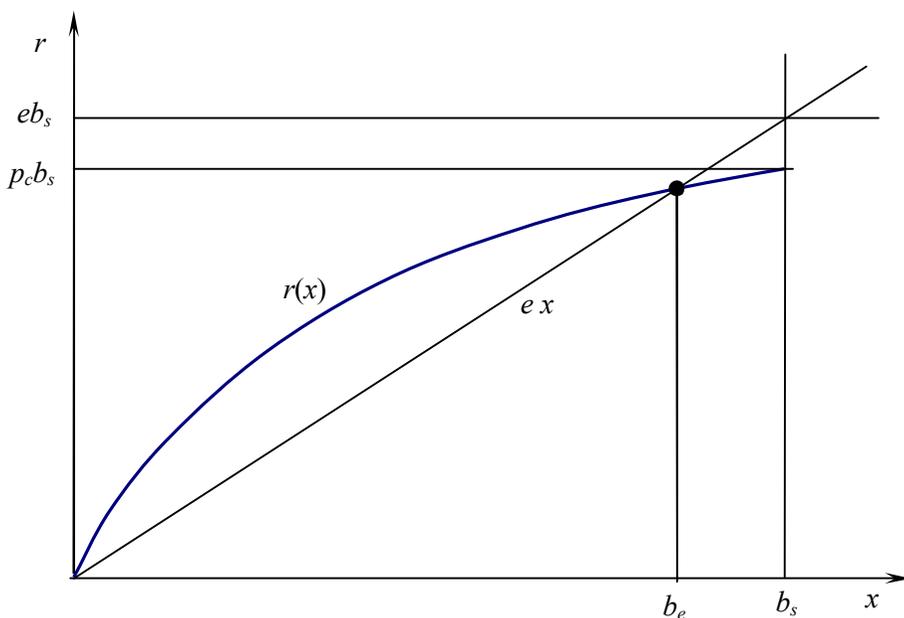


Рис. 2. Непрерывное распределение ресурса $r(x)$ при линейно убывающей функции $p(x)$

Чтобы исследовать влияние характера распределения показателя качества в системе хранения, рассмотрим нелинейные законы $p(x)$. Пусть $p(x)$ – монотонно-возрастающая функция

$$p(x) = p_l + kx^v, \quad (12)$$

где p_l – минимальное значение p .

Тогда на том же интервале $\overline{0, b_s}$

$$r(x) = \int_0^{b_s} p(x) dx = \int_0^{b_s} (p_l + kx^v) dx = p_l b_s + \frac{1}{v+1} k b_s^{v+1}. \quad (13)$$

Из условия $r(b_s) = p_c b_s$ находим $k = \frac{(v+1)(p_c - p_l)}{b_s^v}$. При этом

$$r(x) = p_l x + \frac{p_c - p_l}{b_s^v} x^{v+1}. \quad (14)$$

Приравнявая $r(b_e) = e b_e$, получим

$$b_e = b_s \sqrt[v]{\frac{e - p_l}{p_c - p_l}}, \text{ при } 0 < b_e \leq b_s. \quad (15)$$

Как и для (7), необходимым условием существования решения для возрастающей функции $p(x)$ будет неравенство $p_c \geq e$.

Очевидно, что при $p_c \leq e$ функция $p(x)$ должна быть убывающей:

$$p(x) = p_h - kx^\nu, \quad (16)$$

где p_h – максимальное значение p . При этом

$$r(x) = p_h x + \frac{p_h - p_c}{b_s^\nu} x^{\nu+1}. \quad (17)$$

Решением при $r(b_e) = eb_e$ будет

$$b_e = b_s \sqrt[\nu]{\frac{p_h - e}{p_h - p_c}}, \text{ при } 0 < x \leq b_s. \quad (18)$$

Исследуем влияние степени нелинейности функций (12), (16) на величину b_e . Для (12), учитывая, что $p_c \geq e$, вычислим

$$\lim_{\nu \rightarrow \infty} \left(b_s \sqrt[\nu]{\frac{e - p_l}{p_c - p_l}} \right) = b_s. \quad (19)$$

Из (19) следует, что с ростом степени ν функции $p(x)$ максимальный объем сырья базисного качества b_e стремится к b_s . Аналогичный вывод справедлив и для решения (18). Следовательно, лучшее использование сырья с одним показателем качества достигается при нелинейных законах распределения ресурса $r(x)$ в системе хранения, причем рост степени нелинейности приводит к повышению коэффициента использования запасов сырья для производства.

Вернемся к дискретному распределению сырья в звеньях хранения в форме (1). В этом случае функция распределения $r(x)$ будет кусочно-линейной, как показано на рис. 3.

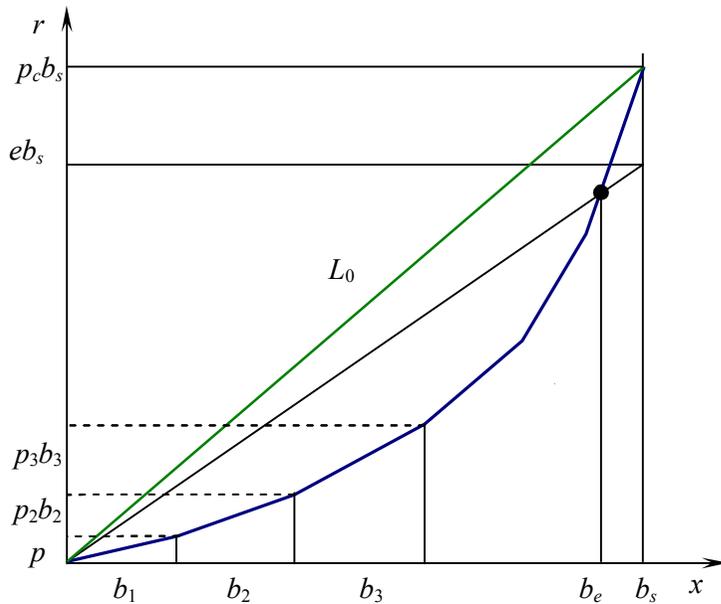


Рис. 3. Дискретное распределение ресурса $r(x)$ в системе хранения

На рисунке интервалы b_1, b_2, \dots, b_n по оси x обозначают количество сырья в соответствующих звеньях хранения, а интервалы $p_1b_1, p_2b_2, \dots, p_nb_n$ на оси r – относя-

щиеся к ним значения количественно-качественного ресурса.

Вместо степени нелинейности $r(x)$ можно оценить степень отклонения ее от линейного закона в виде отношения γ длины L графика реального распределения $r(x)$ на интервале $\overline{0, b_s}$ к длине L_0 графика $r(x)$ наихудшего распределения при $p(x) = p_c$ на том же интервале:

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(p_i b_i)^2 + b_i^2}}{\sqrt{(p_c b_s)^2 + b_s^2}}. \quad (20)$$

В соответствии с определением (20) $\min(\gamma) = 1$, что соответствует равномерному распределению сырья с постоянным показателем качества e . Отметим, что значение γ не зависит от порядка рассмотрения партий, т. е. имеет объективный характер.

Переходя к общему случаю для m -мерного пространства показателей качества сырья в системе хранения из n звеньев

$$\{(b_i, \{p_{ij}\} | j = 1, \dots, m) | i = 1, \dots, n\}, \quad (21)$$

критерий γ можно определить как

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\sum_{j=1}^m (p_{ij} b_i)^2 + b_i^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (p_{cj} b_s)^2 + b_s^2}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(b_i \sqrt{\sum_{j=1}^m (p_{ij}^2) + 1} \right)}{b_s \sqrt{\sum_{j=1}^m (p_{cj}^2) + 1}}. \quad (22)$$

Теперь, используя предложенный критерий γ , рассмотрим задачу о рациональном размещении поступающей партии $(b, \{p_j\} | j = 1, \dots, m)$. Целью выбора размещения партии должно быть наибольшее значение γ . Формальная постановка задачи: требуется найти индекс I_u звена хранения в системе (21) для размещения в ней партии $(b, \{p_j\} | j = 1, \dots, m)$, т. е.

$$I_u = \text{ind}(\max(\gamma_1, \dots, \gamma_k, \dots, \gamma_n)), \quad (23)$$

где

$$\gamma_k = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\sum_{j=1}^m (p_{ij} b_i)^2 + b_i^2}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (p_{cj} b_s + b p_j)^2 + (b_s + b)^2}}, \quad k = 1, \dots, n. \quad (24)$$

Причем для $i = k$ $b_i = b_i + b$, $p_{ij} = \frac{b_i p_{ij} + b p_j}{b_i + b}$.

Решение задачи (23) сводится к вычислению по формуле (24) списка значений $\gamma_1, \dots, \gamma_k, \dots, \gamma_n$ для всех звеньев хранения. Представим результат списком пар $G = (\gamma_1, I_1), \dots, (\gamma_k, I_k), \dots, (\gamma_n, I_n)$, где $I_k = k$ – индекс очередного звена хранения. По-

сле ранжирования G по возрастанию γ_k имеем $I_u = I_n$.

Целенаправленный выбор звеньев хранения для размещения поступающих партий сырья согласно предложенной методике направлен на максимальное использование сырья в производстве и минимизацию доли непригодного для переработки сырья в общем объеме запасов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Taha Хэмди А.* Введение в исследование операций. 6-е изд.: Пер. с англ. – М: Вильямс, 2001. – 912 с.
2. *Хедли Дж., Уайтин Т.* Анализ систем управления запасами. – М.: Наука, 1969. – 511 с.
3. *Пугачев А.И.* Системный анализ перерабатывающего предприятия // Компьютерные технологии в науке, практике и образовании: Труды VII Всероссийской межвузовской науч.-практич. конф. – Самара: СамГТУ, 2008. – С. 113-115.

Статья поступила в редакцию 5 октября 2012 г.

RAW MATERIAL PLACING MANAGEMENT ON PROCESSING PLANT

A.I. Pugachev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The paper deals with the problems of ensuring the complete raw material processing in terms of its preliminarily placing at the purveyance stage. The paper gives the theoretical substantiation of the strategy of rational placing of incoming raw material batches at the plant storage facility. The paper also suggests methods of optimal selection of save place for every raw material batch based on this strategy.

Keywords: *batch of raw material, indices of quality, storage unit, allocate of resources.*

НЕЧЕТКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАНСФЕРНОЙ СИСТЕМЫ АВИАПЕРЕВОЗОК

В.А. Романенко

Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королева
(национальный исследовательский университет)
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34
E-mail: vla_rom@mail.ru

На основе нечетко-множественного подхода решена задача оптимизации расписания движения воздушных судов (ВС) с учетом параметров технологического графика наземного обслуживания для аэропорта, действующего в рамках трансферной системы авиаперевозок. Приведен модельный пример решения задачи.

Ключевые слова: оптимизация, нечеткие числа, узловой аэропорт.

Введение. Трансферная система пассажирских авиаперевозок включает в качестве основных элементов узловой аэропорт (хаб) и хабообразующую авиакомпанию. Для сокращения времени пребывания трансферных пассажиров в хабе его расписание строится по волновому принципу: массовые прибытия рейсов сменяются их массовыми отправлениями, между «волнами» прибытий-отправлений следуют паузы для обеспечения трансфера пассажиров между стыковочными рейсами.

Рассматривается задача оптимизации, предполагающая поиск совокупности плановых (по расписанию) моментов прилетов и вылетов ВС в пределах определенной волны, обеспечивающей максимум доходов хабообразующей авиакомпании от перевозки трансферных пассажиров, пересеживающихся в хабе в течение рассматриваемой волны прилетов-вылетов. Решение задачи связано с наличием неопределенности в исходных данных. Так, выбранная в качестве критерия величина суммарных доходов зависит от величин тарифа и уровней пассажиропотока на трансферных авиасвязях, носящих неопределенный характер. Неопределенной и трудноформализуемой является степень привлекательности времени пребывания в хабе с точки зрения трансферного пассажира, влияющая на уровень пассажиропотока. Вероятностный характер носят продолжительности наземного обслуживания ВС и пассажиров, а также отклонения прилетов и вылетов ВС от расписания. Представляется целесообразным представить все неопределенные величины в единой нечеткой форме. В этом случае задача оптимизации расписания сводится к задаче нечеткого математического программирования. Учет неопределенности временных характеристик аэропортового обслуживания рейсов требует включения некоторых из них в состав оптимизируемых параметров наряду с параметрами расписания.

Постановка оптимизационной задачи. Рассмотрим отдельную волну прибытий-отправлений, в течение которой в хаб прилетают, проходят обслуживание и вылетают K ВС. Пусть перевозчик может по своему усмотрению задавать плановые моменты времени прибытия t_k^a и отправления t_k^d k -го ($k = 1, \dots, K$) ВС, а также интервал времени T_k^f от момента наступления готовности ВС к посадке пассажиров до планового времени вылета. Используем также фактические (с учетом отклонения от

расписания) нечеткие моменты времени прибытия \tilde{t}_k^a и отправления \tilde{t}_k^d k -го ВС.

Обозначим как ij трансферную авиасвязь, поддерживаемую двумя рейсами, первый из которых выполняет прилетающий ВС под номером $i = 1, \dots, K$, а второй – вылетающий ВС под номером $j = 1, \dots, K$. Предполагается, что экспертами для трансферных авиасвязей определены нечеткие величины тарифов \tilde{c}_{ij} ($i, j = 1, \dots, K$) и емкостей авиарынка \tilde{D}_{ij} ($i, j = 1, \dots, K$). Под \tilde{D}_{ij} понимается максимальное число потенциальных пассажиров, имеющих потребность и возможности совершить поездку на авиасвязи ij по установленному тарифу в течение рассматриваемой волны.

Необходимо учесть, что не все пассажиры, составляющие \tilde{D}_{ij} , принесут доход хабообразующей авиакомпании. Так, от ее услуг, вероятно, откажутся пассажиры, которых не устраивает длительность пересадки в хабе. Также не принесут авиакомпании положительных коммерческих результатов пассажиры рейсов, отправленных с опозданием, или трансферные пассажиры, опоздавшие к посадке на ВС.

Введем величину \tilde{d}_{ij} , выражающую нечеткое число пассажиров, воспользовавшихся перевозкой на авиасвязи ij и при этом принесших доход авиакомпании:

$$\tilde{d}_{ij} = \tilde{D}_{ij} k_{ij}^H k_j^C k_{ij}^T \quad (i, j = 1, \dots, K),$$

где k_{ij}^H – доля пассажиров, воспользовавшихся трансферной перевозкой на авиасвязи ij , от общего числа потенциальных пассажиров этой авиасвязи; k_j^C – доля вылетов j -х ВС, выполненных без нарушения расписания, от общего числа вылетов j -х ВС за некоторый интервал времени; k_{ij}^T – доля трансферных пассажиров авиасвязи ij , своевременно прошедших предполетное обслуживание в хабе и не опоздавших к началу посадки, от общего числа трансферных пассажиров авиасвязи ij .

Учитывая зависимость введенных коэффициентов от параметров оптимизации, формулу нечеткой суммы доходов авиакомпании от перевозки трансферных пассажиров одной волны прилетов-вылетов рейсов в хабе \tilde{C} запишем в виде

$$\tilde{C} = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K \tilde{c}_{ij} \tilde{d}_{ij} (t_i^a, t_j^d, T_j^T) \quad (i, j = 1, \dots, K). \quad (1)$$

При решении оптимизационной задачи необходимо учитывать ограничение на временной интервал между взлетно-посадочными операциями (ВПО). Для всех $m = 1, 2, \dots, (2K - 1)$ должно выполняться условие

$$\Delta t \leq (t_n^{ВПО} - t_m^{ВПО}) \quad (n = (m + 1), \dots, 2K), \quad (2)$$

где $t_m^{ВПО}$ – момент времени выполнения m -й ВПО. Элементы множества моментов выполнения ВПО определяются как

$$t_m^{ВПО} = \begin{cases} t_i^a, & m = i, \quad i = 1, \dots, K, \\ t_j^d, & m = K + j, \quad j = 1, \dots, K. \end{cases}$$

Таким образом, рассматриваемая задача оптимизации состоит в определении переменных t_k^a , t_k^d и T_k^T ($k = 1, \dots, K$), обеспечивающих максимум целевой функции

\tilde{C} (1) и удовлетворяющих ограничению (2).

Модельный технологический график наземного обслуживания ВС. Коэффициенты k_j^C и k_{ij}^T , используемые при расчетах целевой функции \tilde{C} , зависят от затрат времени пребывания ВС и трансферных пассажиров в хабе. Поэтому прежде чем перейти к описанию методики определения \tilde{C} , рассмотрим вопросы, связанные с технологией обслуживания перевозок в хабе. С целью упрощения технологического графика наземного обслуживания ВС, включающего несколько десятков операций, объединим все технологические операции в четыре следующие работы.

Работа 1. Обслуживание ВС и пассажиров, выполняемое по прилету.

Работа 2. Обслуживание ВС, выполняемое при отсутствии пассажиров на борту.

Работа 3. Обслуживание трансферных пассажиров в терминале, которое для k -го ВС рассматривается как совокупность работ по обслуживанию групп пассажиров, пересеживающихся с ряда прилетевших i -х ($i = 1, \dots, K$) ВС на вылетающее k -е ВС.

Работа 4. Обслуживание ВС и пассажиров, выполняемое перед вылетом.

С учетом введенного группирования операций модельный технологический график принимает вид, представленный на рис. 1, где кружками обозначены события, а стрелками следующие фактические и фиктивные работы или интервалы времени:

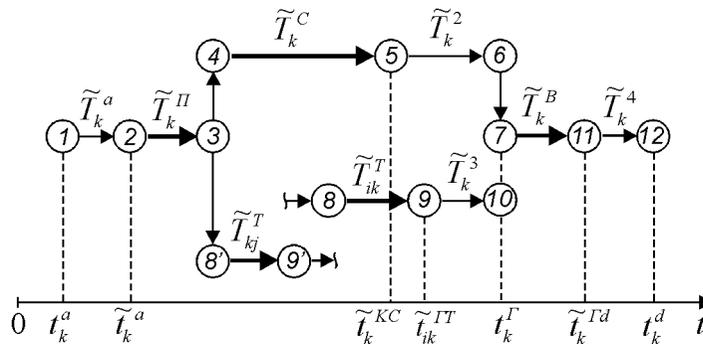


Рис. 1. Модельный технологический график обслуживания ВС

1-2 – интервал между плановым t_k^a и фактическим \tilde{t}_k^a моментами времени прилета k -го ВС нечеткой продолжительностью $\tilde{T}_k^a = \tilde{t}_k^a - t_k^a$;

2-3 – работа 1 нечеткой фактической продолжительностью \tilde{T}_k^{Π} ;

4-5 – работа 2 нечеткой фактической продолжительностью \tilde{T}_k^C , начинающаяся сразу по окончании работы 1 и оканчивающаяся в нечеткий момент времени \tilde{t}_k^{KC} ;

5-6 – интервал времени простоя ВС в ожидании начала выполнения работы 4 нечеткой продолжительностью \tilde{T}_k^2 . Фиктивная работа 5-6 имеет место в случае, если выполнение работы 2 завершается раньше наступления планового момента готовности ВС к началу выполнения работы 4 $t_k^{\Gamma} = t_k^d - T_k^{\Gamma}$, где T_k^{Γ} – интервал от начала выполнения работы 4 до вылета, задаваемый технологическим графиком;

7-11 – работа 4 нечеткой фактической продолжительностью \tilde{T}_k^B , начинающаяся при соблюдении технологического графика в момент t_k^{Γ} или в случае отставания от

графика по окончании работы 2. Фактическое время окончания работы 4 совпадает с фактическим временем готовности ВС к вылету \tilde{t}_k^{Fd} ;

11-12 – интервал нечеткой фактической продолжительностью \tilde{T}_k^4 между готовностью ВС к вылету \tilde{t}_k^{Fd} и плановым временем вылета t_k^d ;

8'-9' – технологические операции нечеткой продолжительностью \tilde{T}_{kj}^T по обслуживанию группы трансферных пассажиров, пересаживающихся с k -го на j -й ВС ($i = 1, \dots, K$). Не входят в состав технологического графика обслуживания k -го ВС, поэтому обозначены штрихами и приводятся для справки;

8-9 – технологические операции нечеткой продолжительностью \tilde{T}_{ik}^T , входящие в состав работы 3 по обслуживанию группы трансферных пассажиров, пересаживающихся на k -е с i -го ВС ($i = 1, \dots, K$). Предполагается, что на k -е ВС успевают только те группы трансферных пассажиров, пересаживающихся с i -х ($i = 1, \dots, K$) ВС, для которых работа 8-9 завершается до начала выполнения работы 4 k -го ВС. Нечеткое время окончания работы 8-9 – \tilde{t}_{ik}^{TT} .

9-10 – интервал времени нечеткой продолжительностью \tilde{T}_k^3 между окончанием обслуживания трансферных пассажиров и плановым временем готовности ВС к выполнению предполетных операций.

Определение целевой функции. Предварительно определимся с типами нечетких величин, используемых при нахождении \tilde{C} . Будем считать \tilde{D}_{ij} и \tilde{c}_{ij} ($i, j = 1, \dots, K$) нечеткими числами с треугольными функциями принадлежности. Следуя обозначениям, использованным на рис. 2, а, представим их в виде $\tilde{D}_{ij} = (D_{ij}^L, D_{ij}^M, D_{ij}^R)$ и $\tilde{c}_{ij} = (c_{ij}^L, c_{ij}^M, c_{ij}^R)$. Нечетким продолжительностям работ и интервалу \tilde{T}_k^a поставим в соответствие трапецидальные функции принадлежности с четырьмя реперными точками $(t^{(1)}, t^{(2)}, t^{(3)}, t^{(4)})$ (рис. 2, б).

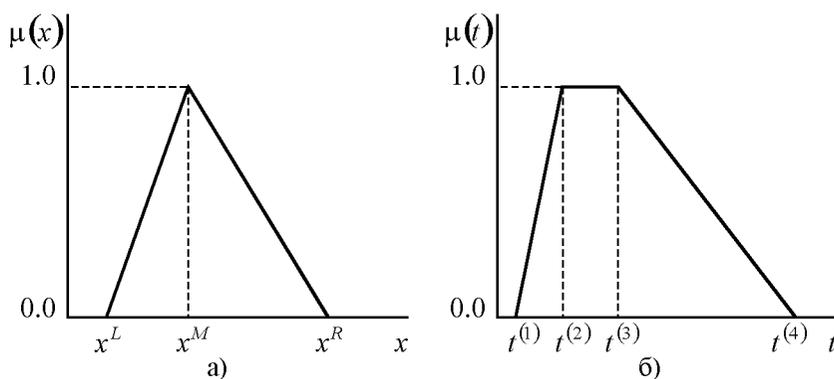


Рис. 2. Треугольная (а) и трапецидальная (б) функции принадлежности

Для определения коэффициента k_{ij}^{II} выразим предпочтения трансферных пассажиров в отношении времени пребывания в хабе $T_{ij}^X = t_j^d - t_i^a$ с помощью трапеци-

дальной функции желательности $\lambda_{T^X}(t)$, четырем реперным точкам, которой придадим согласно [1] следующие значения: $t^{(1)} = 45$ мин., $t^{(2)} = 75$ мин., $t^{(3)} = 90$ мин., $t^{(4)} = 360$ мин. В рассматриваемой задаче функция желательности $\lambda_{T^X}(t)$ по смыслу совпадает с коэффициентом k_{ij}^{Π} , поэтому будем считать $k_{ij}^{\Pi}(t) \equiv \lambda_{T^X}(t)$.

Определим теперь k_j^C и k_{ij}^T . Процедуру решения данной задачи иллюстрирует рис. 2, где отображены графики функций принадлежности необходимых нечетких временных характеристик.

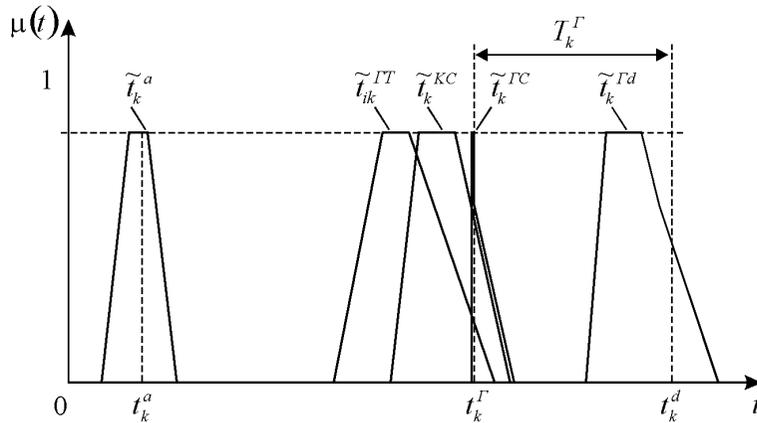


Рис. 3. К определению коэффициентов k_j^C и k_{ij}^T

Коэффициент k_k^C будем рассматривать как вероятность того, что фактическая готовность к вылету k -го ВС наступит раньше планового момента вылета t_k^d , т. е. $k_k^C = P(\tilde{t}_k^{\Gamma d} < t_k^d)$.

Используя введенные выше обозначения, запишем формулы для определения $\tilde{t}_k^{\Gamma d}$, в которых операции сложения и взятия максимума нечетких чисел выполняются с использованием уровнейных множеств [2]:

$$\begin{aligned} \tilde{t}_k^{\Gamma d} &= \tilde{t}_k^{\Gamma C} + \tilde{T}_k^B, \\ \tilde{t}_k^{\Gamma C} &= \max(\tilde{t}_k^{KC}, t_k^{\Gamma}), \\ \tilde{t}_k^{KC} &= \tilde{t}_k^a + \tilde{T}_k^{\Pi} + \tilde{T}_k^C = t_k^a + \tilde{T}_k^a + \tilde{T}_k^{\Pi} + \tilde{T}_k^C, \end{aligned}$$

где $\tilde{t}_k^{\Gamma C}$ – фактическое время готовности ВС к началу выполнения работы 4.

Коэффициент k_{ij}^T интерпретируем как вероятность того, что готовность к посадке на j -е ВС пассажиров, пересеживающихся с i -го ВС, наступит раньше, чем начнутся операции, выполняемые перед вылетом j -го ВС, т. е. $k_{ij}^T = P(\tilde{t}_{ij}^{\Gamma T} < \tilde{t}_j^{\Gamma C})$.

Величина $\tilde{t}_{ik}^{\Gamma T}$ определяется в результате нечеткого сложения по формуле

$$\tilde{t}_{ik}^{\Gamma T} = \tilde{t}_k^a + \tilde{T}_k^{\Pi} + \tilde{T}_{ik}^T = t_k^a + \tilde{T}_k^a + \tilde{T}_k^{\Pi} + \tilde{T}_{ik}^T.$$

Примем, что \tilde{T}_{ik}^T зависит от продолжительности наиболее трудоемкой операции по обслуживанию трансферных пассажиров в хабе и определяется как произведение

$$\tilde{T}_{ik}^T = \tilde{T}^{1T} \tilde{d}'_{ik},$$

где \tilde{T}^{1T} – нечеткая продолжительность регистрации одного трансферного пассажира; $\tilde{d}'_{ik} = \tilde{D}_{ik} k_{ik}^{\Pi}$ – нечеткое число пассажиров, воспользовавшихся перевозкой на трансферной авиасвязи через рассматриваемый хаб.

Для вычисления вероятностей $P(\tilde{t}_k^{Td} < t_k^d)$ и $P(\tilde{t}_{ij}^{GT} < \tilde{t}_j^{GC})$ используется несколько модифицированный теоретико-вероятностный подход, предложенный в [3].

Нечеткий вид целевой функции \tilde{C} , определяемой по изложенной методике, приводит к многокритериальности оптимизационной задачи, множество решений которой не представляет большой ценности для практики аэропорта. Дефаззификация целевой функции, производимая здесь по методу центра тяжести [4], позволяет, применив известные методы оптимизации, получить единственное решение.

Модельный пример. Ниже описаны результаты решения задачи оптимизации параметров трансферной системы перевозок на базе одного из крупных аэропортов РФ. Рассмотрена гипотетическая волна прилетов-вылетов, формируемая 10 ВС. Экспертные оценки потенциального пассажиропотока и трансферных тарифов (последние выражены в некоторых условных единицах) приведены в табл. 1. Прочерки означают авиасвязи, к которым отсутствует интерес со стороны потенциальных пассажиров. В целях экономии места в табл. 1 приведены значения D_{ij}^M и c_{ij}^M , соответствующие ядрам нечетких множеств \tilde{D}_{ij} и \tilde{c}_{ij} . Следующие примеры позволяют оценить характер нечетких данных: $\tilde{D}_{9,2} = (1, 2, 4)$ пас., $\tilde{c}_{9,2} = (20.5, 21.2, 21.8)$ у.е., $\tilde{D}_{1,1} = (4, 16, 20)$ пас., $\tilde{c}_{1,1} = (20.3, 21.0, 21.6)$ у.е., $\tilde{D}_{7,4} = (8, 53, 125)$ пас., $\tilde{c}_{7,4} = (15.0, 15.6, 16.2)$ пас. Заметен значительный разброс уровней возможного пассажиропотока и сравнительно малый разброс тарифов.

Таблица 1

Характеристики трансферных авиасвязей D_{ij}^M , пас. / c_{ij}^M , у.е.

i	j									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	16 / 21,0	–	–	–	–	4 / 14,2	–	–	–	–
2	–	–	–	–	–	–	18 / 13,9	–	2 / 13,8	3 / 13,7
3	–	–	26 / 18,4	9 / 16,4	–	–	–	2 / 24,8	–	–
4	–	–	–	18 / 12,2	–	–	–	–	16 / 21,2	19 / 21,5
5	–	–	48 / 17,6	–	–	–	–	6 / 24,0	–	–
6	–	11 / 13,8	–	–	–	21 / 13,8	5 / 13,7	–	19 / 13,9	–
7	–	–	–	53 / 15,6	–	–	–	–	–	–
8	–	24 / 12,8	–	–	3 / 12,7	10 / 12,8	2 / 12,9	–	–	82 / 12,8
9	–	2 / 21,2	–	–	–	–	–	11 / 21,2	–	3 / 21,2
10	–	35 / 14,8	–	–	–	–	45 / 14,8	–	35 / 14,8	–

В модельном примере все ВС разделены на две категории, различающиеся пассажироместимостью и временными параметрами технологического графика. ВС I

категории считаются большими, требующими больших затрат на аэропортовое обслуживание. В рассматриваемом примере к I категории отнесены последние 3 ВС. Нечеткие продолжительности выполнения работ 1, 2 и 4 для обеих категорий ВС, полученные в результате обработки статических материалов базы данных производственной информационной системы аэропорта, приведены в табл. 2. Нечеткое время обслуживания одного трансферного пассажира $\tilde{T}^{1T} = (0.2, 0.3, 0.4, 0.7)$ мин получено по результатам наблюдений в ряде аэропортов.

Модельное расписание для рассматриваемой волны, составляющее главный результат решения оптимизационной задачи, представлено в табл. 3.

Таблица 2

Нечеткие продолжительности работ

Категория ВС	\tilde{T}^{Π} , мин	\tilde{T}^C , мин	\tilde{T}^B , мин
I	(6.5, 9.0, 13.0, 22.0)	(12.0, 19.0, 28.0, 50.0)	(12.0, 17.0, 25.5, 41.0)
II	(5.5, 7.5, 10.0, 16.0)	(10.0, 15.0, 21.0, 38.0)	(9.0, 15.5, 21.0, 37.0)

Таблица 3

Оптимальное расписание

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Категория ВС	II	II	II	II	II	II	II	I	I	I
t_k^a , мин	28	18	21	22	7	20	6	0	2	12
t_k^d , мин	112	104	110	109	86	118	105	98	113	123
$(t_k^d - t_k^a)$, мин	84	86	89	87	79	98	99	98	111	111

В оптимальном расписании наглядно отразился групповой характер движения ВС, являющийся одним из атрибутов хаба. ВС прибывают и отправляются тесными группами с малыми интервалами между ВПО, что требует высокой пропускной способности элементов летной полосы и технологических комплексов хаба.

Оптимальные значения времени T^T составляют для ВС I категории 38 мин и для ВС II категории 35 мин, что вполне соответствует практике.

Оптимизация расписания позволила в целом сохранить потенциальный трансферный пассажиропоток. Полученное модельное нечеткое общее число трансферных пассажиров, принесших доходы авиакомпании в течение волны, всего на 14-16 % меньше их заданного потенциального числа.

Заключение. Представленные результаты подтверждают правомерность постановки сформулированной задачи оптимизации расписания движения ВС и работоспособность предложенного алгоритма ее решения. Использование нечетко-множественного подхода позволяет на базе стандартной вычислительной техники быстро получать оптимальные решения, учитывающие неопределенность исходных данных, доступных в условиях работы реальных аэропортовых и авиатранспортных предприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Danesi A. Spatial concentration, temporal co-ordination and profitability of airline hub-and-spoke networks. Ph.D. thesis. – Università di Bologna, 2006. – 143 p.
2. Дюбуа Д., Прад А. Теория возможностей. Приложения к представлению знаний в информатике. –

- М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.
3. Диллигенский Н.В., Дымова Л.Г., Севастьянов П.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 398 с.
 4. Рутковская Д., Пилинский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2012 г.

FUZZY OPTIMIZING OF TRANSFER AIR TRANSPORTATION SYSTEM PARAMETERS

V.A. Romanenko

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University)
34, Moskovskoye sh, Samara, 443086

Based on fuzzy set theory the problem of flight timetable optimizing taking account of aircrafts ground handling activity network parameters for hub-and-spokes system is solved. The model example of a problem solution is considered.

Keywords: *optimizing, fuzzy numbers, hub airport.*

КРИТЕРИАЛЬНЫЕ МНОЖЕСТВА ОЦЕНОК КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ ИНВЕСТИЦИОННЫМ ПОРТФЕЛЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КРИТЕРИЯХ РИСКА

В.Г. Саркисов

Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244
E-mail: vigen.sarkisov@mail.ru

Рассматривается вопрос построения и анализа критериальных множеств оценок качества управления портфелем. Исследованы различные критерии, применяемые при оценке риска. Проведен анализ моделей портфеля с ограничениями Марковица и Блэка, а также ограничениями, установленными российским законодательством для квалифицированных и неквалифицированных инвесторов.

Ключевые слова: оценка риска, критериальное множество, множество Парето, инвестиционный портфель.

Введение. Оптимизация инвестиционного портфеля (а в более общем случае – оптимизация системы управления портфелем) в большинстве случаев включает следующие этапы:

- 1) выбор критериев оптимальности. Обычно в качестве критериев выбираются те или иные оценки потенциальной прибыли (доходность) и убытков (риск);
- 2) построение критериального множества, содержащего значения критериев для всех реализуемых портфелей;
- 3) определение эффективной границы критериального множества, состоящей из недоминируемых портфелей;
- 4) выбор портфеля на эффективной границе.

Наиболее проработанным является подход Марковица [1], подразумевающий использование в качестве оценки доходности ее математического ожидания, а в качестве оценки риска – дисперсии доходности.

В настоящей статье производится анализ ограничений российского финансового рынка и рассматривается вопрос построения критериальных множеств и нахождения эффективных границ для различных оценок риска.

Ограничения на доли инвестиционных инструментов в портфеле. Рассмотрим преобразование относительных приращений $\Delta C_n(t)$ цен инвестиционных инструментов в относительное приращение $\Delta S(t)$ стоимости портфеля $S(t)$:

$$\Delta S(t) = \sum_{n=1}^N (\alpha_n(t-1) \cdot \Delta C_n(t)), \quad (1)$$

где N – количество рассматриваемых инвестиционных инструментов, $\Delta S(t) = (S(t) - S(t-1)) / S(t-1)$ – относительное приращение стоимости портфеля за t -ый период; $\alpha_n(t-1)$ – доля n -го инструмента в портфеле на конец $(t-1)$ -го периода времени. Денежные средства рассматриваются как инвестиционный инструмент с нулевыми приращениями цены.

На доли α_n могут быть наложены ограничения в соответствии с одним из вариантов, например:

- 1) портфель квалифицированного инвестора [2];
- 2) портфель неквалифицированного инвестора;
- 3) портфель с неограниченным кредитованием (портфель Блэка);
- 4) портфель без использования кредитования (портфель Марковица).

Рассмотрим наиболее общий случай и далее формализуем перечисленные выше варианты. Для каждого инвестиционного инструмента введем коэффициенты β_n^L и β_n^S , показывающие максимальный размер кредитования для данного инструмента при открытии длинных и коротких позиций соответственно. Например, при $\beta_n^L = \beta_n^S = 3$ инвестор может взять кредит в размере не более 300 % собственных средств, что позволяет ему открыть длинную позицию на 400 % (100 % собственных + 300 % заемных), а короткую – на 300 % (заемных) от собственных средств. Ограничение на доли инструментов в портфеле в общем случае имеет вид

$$\sum_{n=1}^N \left[\begin{cases} \alpha_n / (\beta_n^L + 1), & \text{при } \alpha_n > 0 \\ -\alpha_n / \beta_n^S, & \text{при } \alpha_n < 0 \end{cases} \right] = 1. \quad (2)$$

Модель портфеля Блэка допускает сколь угодно большой размер кредитования как денежными средствами, так и инвестиционными инструментами ($\beta_n^L = \beta_n^S = \infty$) и имеет единственное ограничение:

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n = 1. \quad (3)$$

Ограничение (3) не может быть получено из (2), так как не отражает реальных условий кредитования. Практическое применение ограничения (3) означало бы, что разница в объемах открытых длинных и коротких позиций была бы равна объему собственных средств инвестора, а кредит на открытие длинных позиций «компенсировался» бы аналогичным кредитом на открытие коротких позиций. Таким образом, портфель Блэка, являясь удобной математической моделью, имеет лишь косвенное отношение к реальному управлению инвестиционным портфелем.

Портфель Марковица не предполагает использования заемных средств ($\beta_n^L = \beta_n^S = 0$). При этом общее условие (2) вырождается в (4), являющееся ограничением портфеля в модели Блэка, дополненным требованием неотрицательности долей портфеля:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=1}^N \alpha_n = 1 \\ \alpha_n \geq 0, \forall n \end{array} \right. \quad (4)$$

В отличие от ограничений портфеля Блэка ограничения на портфель Марковица реализуемы.

Российское законодательство разделяет всех инвесторов на категории квалифицированных и неквалифицированных в зависимости от опыта работы, объема инвестиционного портфеля, объема и частоты сделок. При работе с высоколиквидными инструментами квалифицированному инвестору может предоставляться кредитное плечо в размере до 300 % от собственных средств ($\beta_n^L = \beta_n^S = 3$), а неквалифицированному – в размере до 100 % ($\beta_n^L = \beta_n^S = 1$). При работе с низколиквидными инструментами кредитное плечо не предоставляется ($\beta_n^L = \beta_n^S = 0$).

На рис. 1 дано геометрическое представление различных ограничений на доли в портфеле из двух и трех инвестиционных инструментов.

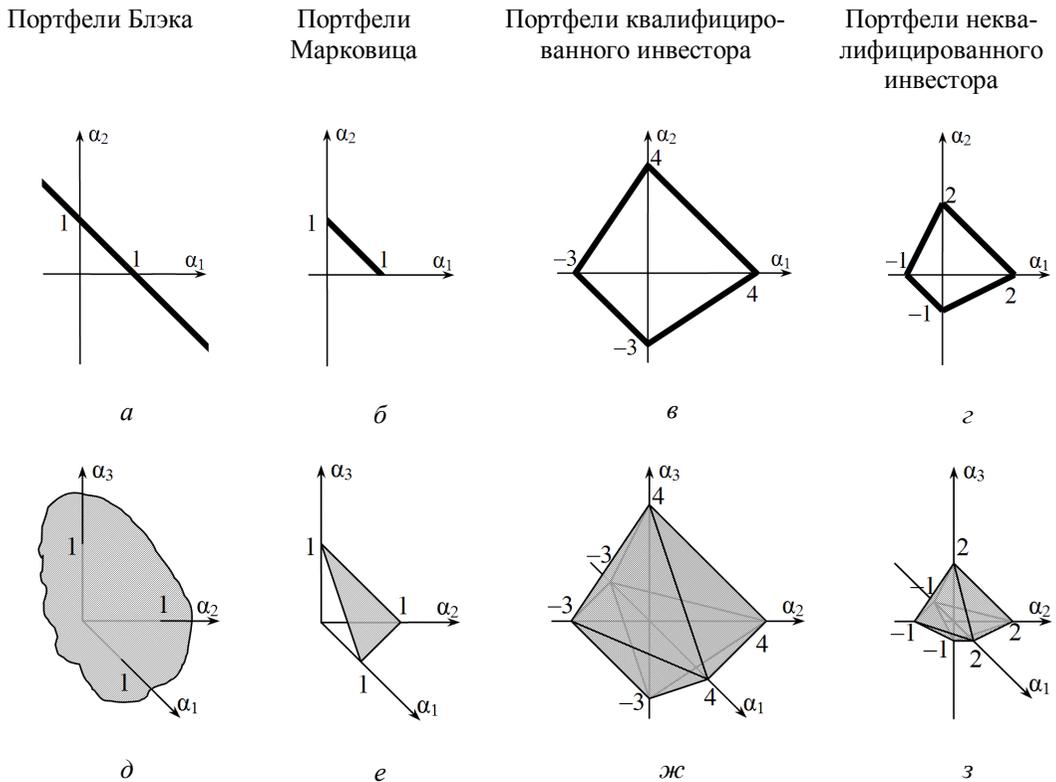


Рис. 1. Множества допустимых портфелей из двух и трех инвестиционных инструментов при ограничениях различных видов

Очевидно, что множество реальных портфелей квалифицированного (как и неквалифицированного) инвестора вовсе не является подмножеством множества портфелей Блэка и многочисленные научные результаты, полученные для портфеля Блэка, при реальном инвестировании следует применять с особой осторожностью. Модель портфеля Марковица корректно описывает случай реального портфеля без кредитования.

Далее рассматриваются оценки качества портфеля квалифицированного инвестора и как частный случай портфеля Марковица.

Анализ критериальных множеств при использовании дисперсии доходности в качестве критерия риска. Дисперсия D_{Π} доходности портфеля может быть однозначно рассчитана на основе дисперсий D_i доходностей входящих в него инструментов и коэффициентов r_{ij} парной корреляции этих доходностей с помощью формулы дисперсии линейной комбинации случайных величин:

$$D_{\Pi} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j r_{ij} \sqrt{D_i D_j}. \quad (5)$$

Математическое ожидание m_{Π} доходности для этого же портфеля

$$m_{\Pi} = \sum_{i=1}^N \alpha_i m_i, \quad (6)$$

где m_i – математическое ожидание доходности i -го инструмента.

Для портфеля из двух инструментов

$$D_{\Pi} = \alpha_1^2 D_1 + \alpha_2^2 D_2 + 2\alpha_1 \alpha_2 r_{12} \sqrt{D_1 D_2}, \quad (7)$$

$$m_{\Pi} = \alpha_1 m_1 + \alpha_2 m_2. \quad (8)$$

На рис. 2 приведен пример критериальных множеств $\{m_{\Pi}, D_{\Pi}\}$ для портфелей из двух рисковых инструментов ($m_2 > m_1 > 0$, $D_2 > D_1$, $r_{12} < 0$) и денежных средств с ограничениями Марковица (внутренняя область треугольника на рис. 1, б), квалифицированного и неквалифицированного инвесторов (внутренние области трапеций на рис. 1, в и 1, г).

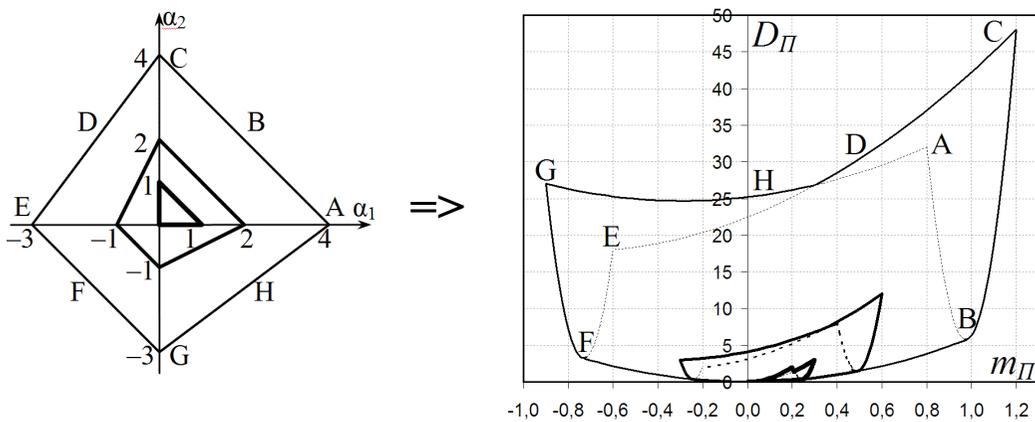


Рис. 2. Ограничения на доли в портфеле и критериальные множества Марковица, квалифицированного и неквалифицированного инвесторов при использовании дисперсии доходности в качестве критерия риска

Границу каждого критериального множества образуют отрезки парабол, являющихся отображениями соответствующих отрезков прямых на рис. 1, б, 1, в и 1, г (для случая квалифицированного инвестора отрезки обозначены буквами А...Н), и парабола FB, соответствующая линии, проходящей через внутренние области треугольника и трапеций на рис. 1, б, 1, в и 1, г. Множество Парето образовано отрезками парабол FB (при $m_{\Pi} > 0$) и BC.

Критериальное множество для неквалифицированного инвестора близко по свойствам к множеству квалифицированного инвестора. Отличие вида критериального множества для портфелей Марковица от остальных обусловлено требованием неотрицательности долей в портфеле.

В некоторых случаях квалифицированный инвестор может получить значительно более высокую доходность при сопоставимом уровне риска (например, на рис. 2 при уровне риска $D_{\Pi} = 5$ квалифицированный инвестор может сформировать портфель с математическим ожиданием доходности $m_{\Pi} = 0,90$, неквалифицированный – с $m_{\Pi} = 0,55$, а ограничения Марковица вообще не позволяют сформировать портфель с доходностью m_{Π} выше 0,3).

Рассмотрим более подробно случаи, когда возникает подобное преимущество.

На рис. 3 представлены три варианта (в порядке убывания коэффициента корреляции r_{12} для случая $m_2 > m_1 > 0$, $D_2 > D_1$), соответствующие различным возможным эффективным границам (для ограничений некавалифицированного инвестора и Марковица).

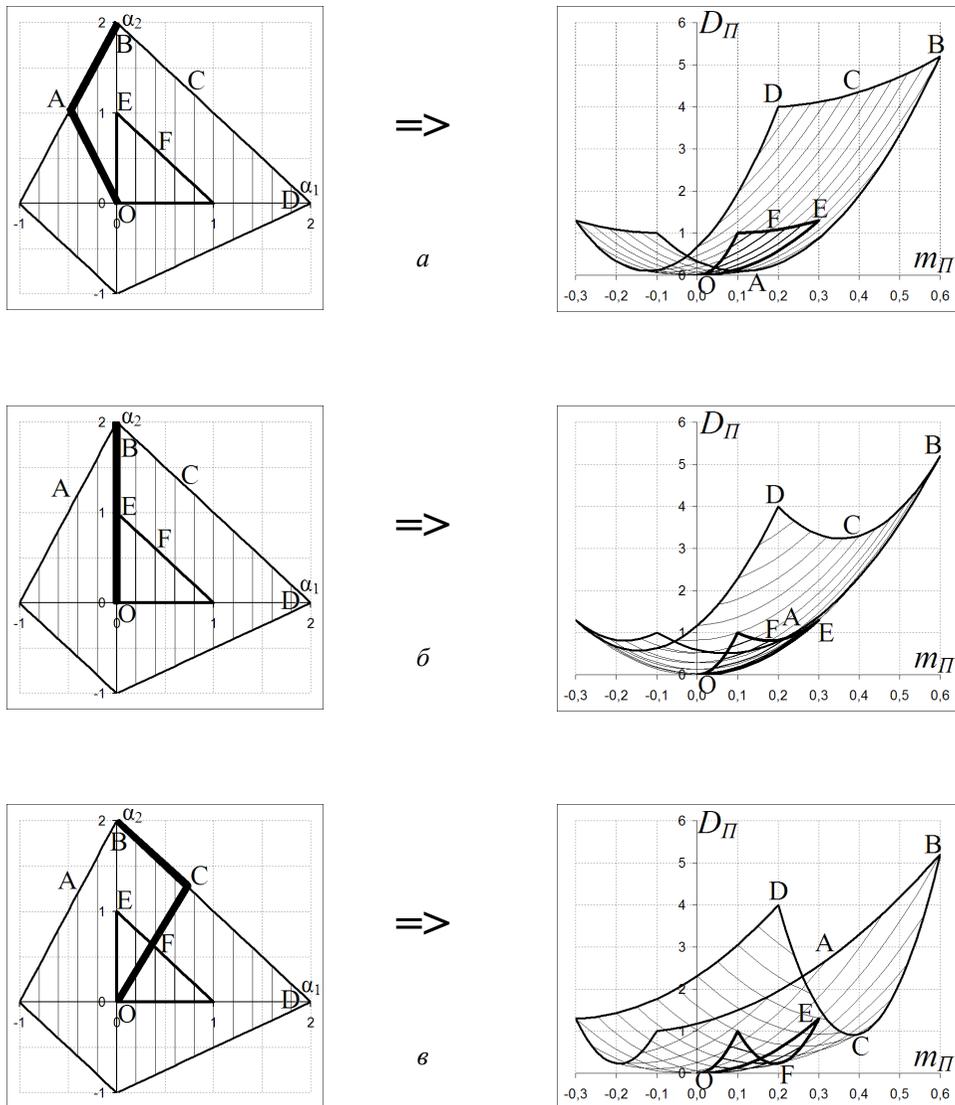


Рис. 3. Варианты критериальных множеств для портфелей Марковица и некавалифицированного инвестора

Точка О соответствует портфелю, на 100 % состоящему из денежных средств ($\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 0$). Для случая сильной положительной корреляции доходностей инструментов, представленного на рис. 3, а, эффективная граница для портфеля некавалифицированного инвестора OAB не содержит отрезок OE, являющийся эффективной границей для портфеля Марковица. В этом случае некавалифицированный инвестор может обеспечить себе более низкий риск при любой достижимой для портфеля Марковица доходности. При получении

доходности большей, чем в точке А, квалифицированный инвестор имеет преимущество над неквалифицированным (аналогично рис. 2).

При ослаблении корреляционной зависимости достигается критический случай, представленный на рис. 3, б, характерной особенностью которого является принадлежность отрезка ОЕ эффективной границе обоих критериальных множеств. В этом случае неквалифицированный инвестор может сформировать оптимальный портфель, отвечающий одновременно и ограничениям Марковица (отрезок ОЕ). Для получения большей доходности, чем у портфеля Марковица, неквалифицированный (и квалифицированный) инвестор вынужден (в отличие от предыдущего случая) принимать больший риск.

При дальнейшем уменьшении r_{12} критериальные множества принимают вид, представленный на рис. 3, в. На отрезке ОЕ оптимальные портфели Марковица и неквалифицированного (и квалифицированного) инвестора совпадают. При дальнейшем увеличении доходности неквалифицированный инвестор может сформировать портфель с более низким риском, чем у портфеля Марковица. Аналогичное преимущество имеет квалифицированный инвестор над неквалифицированным при формировании портфеля с доходностью большей, чем в точке С.

При рассмотрении большего числа инвестиционных инструментов критериальное множество является отображением соответствующих многогранников (например неправильных пирамид и октаэдров), причем отображениями ребер этих многогранников также являются участки парабол на плоскости $\{m_{II}, D_{II}\}$.

Далее будет показано, что некоторые другие критерии риска обладают теми же свойствами, что и дисперсия доходности портфеля.

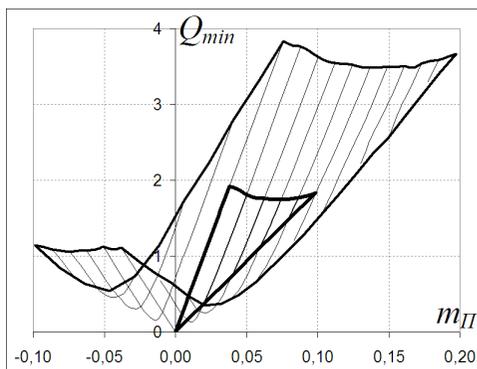
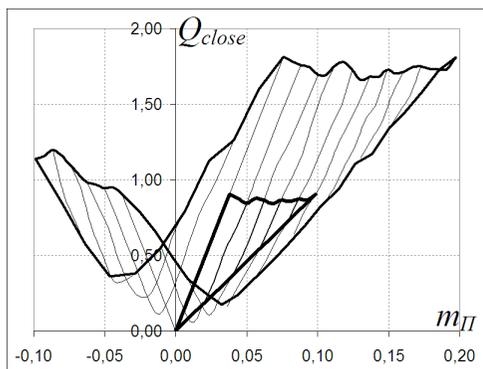
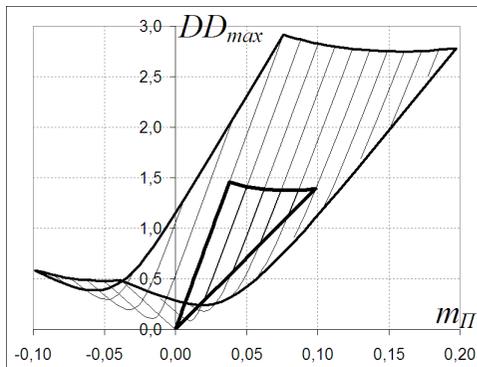
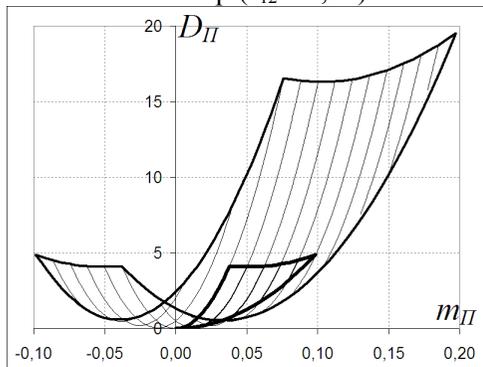
Особенности применения максимальных потерь капитала и квантиля доходности в качестве критериев риска. Существенным недостатком дисперсии в качестве критерия риска является сложность ее интуитивного восприятия неподготовленным инвестором. Намного более понятными показателями [3] являются процент максимальных потерь капитала (maximum drawdown, DD_{max}) [4] и квантили доходности [5] порядка 0,3, рассчитываемые по минимальным ценам за период (Q_{min}) и по ценам на конец периода (Q_{close}) (для унификации взяты с противоположным знаком). На рис. 4 представлены критериальные множества, полученные при использовании четырех рассматриваемых критериев риска.

Приведенные критериальные множества получены в результате статистической обработки данных о торгах акциями на Московской межбанковской валютной бирже (ММВБ). Среди наиболее ликвидных акций были выбраны пары с различными коэффициентами корреляции: наиболее сильно коррелированные обыкновенные и привилегированные акции Сбербанка (SBER и SBERp), акции Газпрома и ЛУКОЙЛа (GAZP и LKOH) со средним уровнем корреляции и наиболее слабо коррелированные акции Транснефти и Уралкалия (TRNFp и URKA).

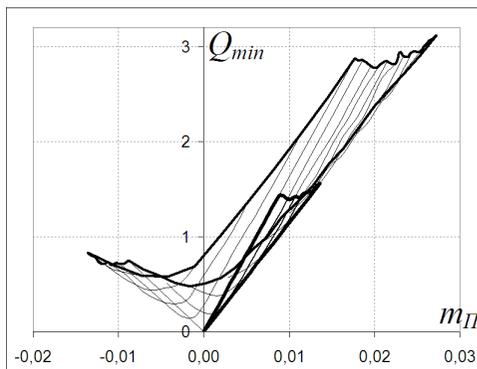
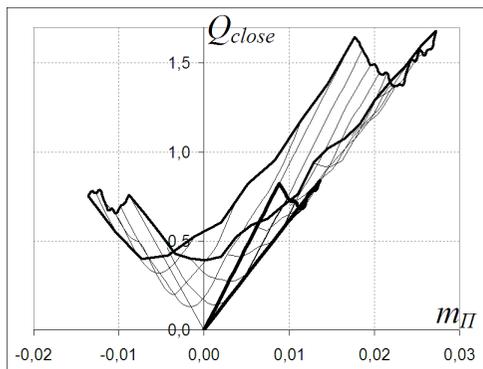
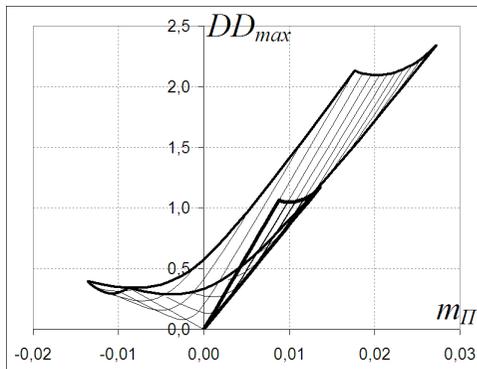
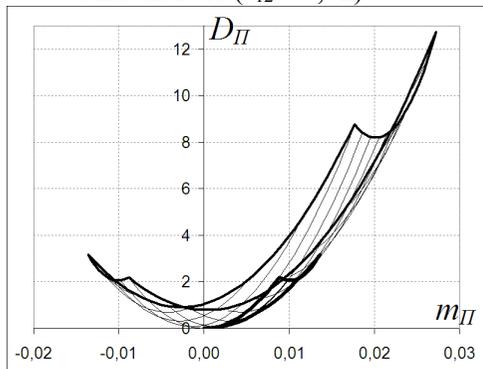
Очевидно, что рассмотренные ранее особенности взаимного расположения критериальных множеств портфелей неквалифицированного инвестора и Марковица сохраняются для всех исследованных критериев риска.

Границами критериальных множеств при критерии риска DD_{max} являются отрезки гипербол и прямых (вырожденных гипербол). В силу ограниченности статистического материала полученные экспериментально границы критериальных множеств при критериях риска Q_{close} и Q_{min} отличаются от гипербол и прямых.

SBER-SBERp ($r_{12} = 0,86$)



GAZP-LKOH ($r_{12} = 0,62$)



TRNFp-URKA ($r_{12} = 0,35$)

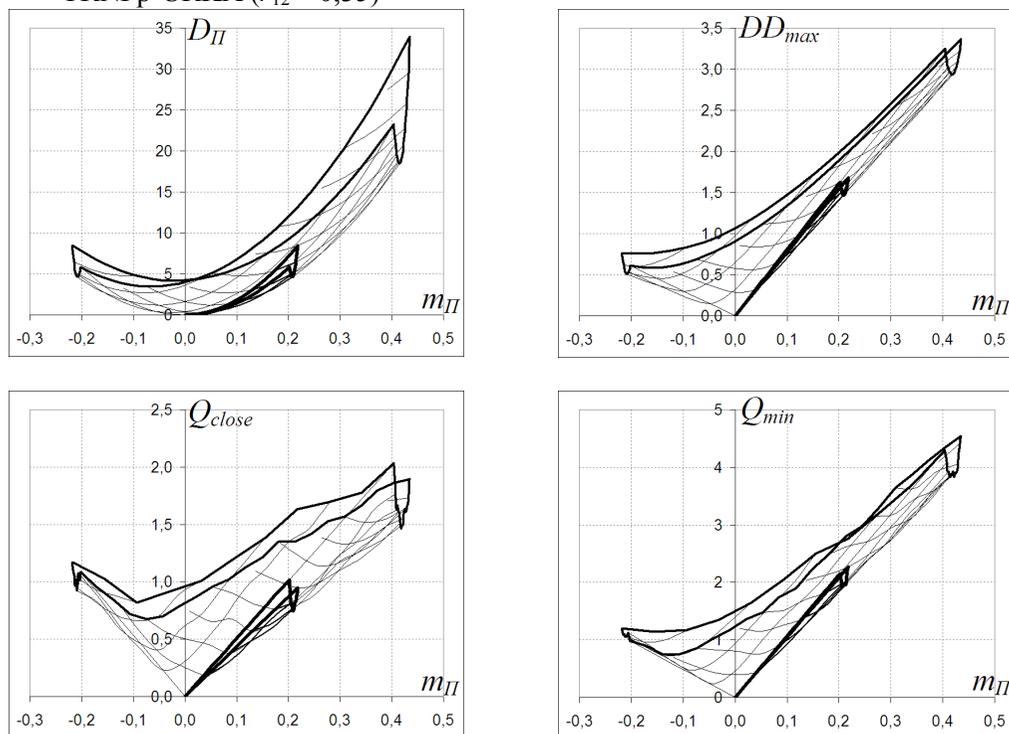


Рис. 4. Критериальные множества при использовании различных критериев риска

Заключение. Проведенный анализ позволил сделать следующие выводы:

- 1) портфель Блэка нереализуем в условиях российского фондового рынка. Предложены математические описания множеств реализуемых портфелей;
- 2) критериальные множества при использовании рассмотренных критериев риска имеют схожие свойства, одинаково изменяясь при изменении корреляции между изменениями цен акций;
- 3) точки перехода между кривыми, образующими эффективную границу критериального множества, соответствуют одним и тем же уровням доходности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Markowitz H.* Portfolio Selection // The Journal Of Finance. – 1952. – № 1. – С. 77-91.
2. Положение о порядке признания лиц квалифицированными инвесторами (приказ ФСФР России от 18.03.2008 № 08-12/пз-н).
3. *Саркисов В.Г.* Модели риска инвестиционного портфеля, ориентированные на приоритеты инвестора // Труды X Международной научно-практической конференции «Финансово-актуарная математика и эвентология безопасности», Красноярск, 2011. – С. 328-331.
4. *ЛеБо Ч., Лукас Д.В.* Компьютерный анализ фьючерсных рынков. – М.: Альпина Паблишер, 2011. – 304 с.
5. *Панков А.Р., Платонов Е.Н., Семенухин К.В.* Минимаксная оптимизация инвестиционного портфеля по квантильному критерию // Автоматика и телемеханика. – 2003. – № 7. – С. 117-133.

Статья поступила в редакцию 5 июля 2012 г.

CRITERION SETS OF ASSESSMENTS OF AN INVESTMENT PORTFOLIO MANAGEMENT QUALITY WITH VARIOUS CRITERIA OF RISK

V.G. Sarkisov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

The issue of modeling and analysis of criterion sets of portfolio management quality assessments is considered. The various risk criteria are investigated. The analysis is carried out for portfolio models with Markowitz's and Black's constraints, and also the Russian legislation constraints for qualified and non-qualified investors.

Keywords: risk assessment, criterion set, Pareto set, investment portfolio.

ДВУХКОНТУРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОБОБЩЕННЫМ ПАРАМЕТРОМ

Б.К. Чостковский¹, В.Ю. Денисов²

¹ Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² ФГУП ГНИ РКЦ «ЦСКБ-Прогресс»
443009, г. Самара, ул. Земеца, 18
E-mail: vladenisov63@gmail.com

Рассматривается использование корректирующих и межконтурных цепей с применением различных видов коррекции и регуляторов в двухконтурной системе управления обобщенным параметром. Исследуются различные методы оптимизации межконтурной связи.

Ключевые слова: *многоконтурные системы, обобщенный параметр, оптимизация регуляторов, межконтурные системы координации, корректирующие цепи, межконтурные регуляторы.*

При автоматизации сложных технических процессов обычно реализуется ряд локальных САУ с частными параметрами качества и выявляется обобщенный параметр, формирующийся как взвешенная сумма частных параметров [1, 2].

Вследствие наличия множества технологических параметров, которые могут повлиять на качество и характеристики готовой продукции, предлагается ввести некоторый обобщенный параметр, по которому можно будет судить о качестве изготавливаемой продукции на определенных этапах технологического производства.

Рассмотрим двухконтурную систему управления обобщенным параметром. Данная система состоит из медленнодействующего и быстродействующего контуров, на выходах которых формируются некоторые частные параметры, а на выходе системы – обобщенный параметр качества P . Целью оптимального управления является приближение выхода системы (обобщенного параметра), равного взвешенной сумме частных параметров, к заданному значению P_0 и минимизация времени переходного процесса. С учетом предполагаемой цифровой реализации системы представим ее в дискретном виде (рис. 1.)

На рис. 1, 2, 5 введены следующие обозначения: x_1 и x_2 – задающие воздействия локальных САУ; $G_{p1}(z)$ и $G_{p2}(z)$ – передаточные функции регуляторов; $G_{oy1}(z)$ и $G_{oy2}(z)$ – передаточные функции объектов управления; f_1 и f_2 – возмущающее воздействие; y_1 и y_2 – выходные воздействия локальных САУ; P – обобщенный параметр; P_0 – заданное значение обобщенного параметра; ΔP – отклонение от заданного значения; K_1 и K_2 – коэффициенты чувствительности обобщенного параметра системы к частным параметрам y_1 и y_2 .

Инерционность объектов управления приводит к тому, что при появлении воз-

Борис Константинович Чостковский (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Владимир Юрьевич Денисов, аспирант.

мушающих воздействий в контурах формируются возмущенные процессы значительной длительности. В результате возникают достаточно длительные отклонения обобщенного параметра P от заданного значения P_0 .

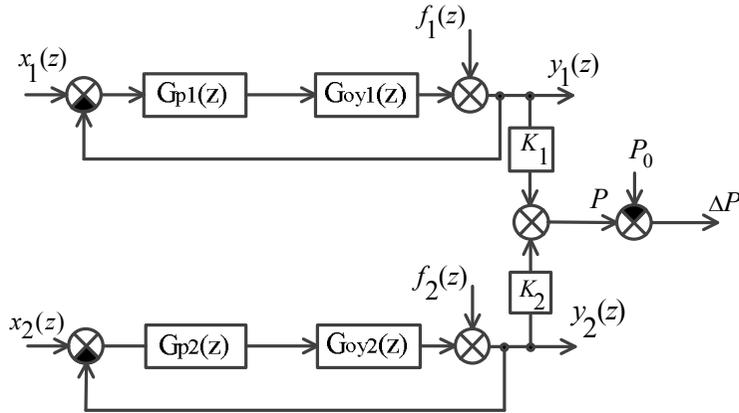


Рис. 1. Структурная схема двухконтурной непрерывной системы

С учетом того, что объекты управления обладают, как правило, разной инерционностью, предположим, что большей инерционностью обладает объект управления 1-го контура и поэтому назовем 1-й контур медленнодействующим, а 2-й – быстродействующим.

Для повышения качества управления по обобщенному параметру между данными двумя локальными контурами предлагается вводить межконтурные связи, которые позволят использовать быстродействующий контур для компенсации влияния на обобщенный параметр возмущенного процесса медленнодействующего контура [1].

Рассмотрим двухконтурную систему управления обобщенным параметром, показанную на рис. 2.

В качестве структурного способа повышения эффективности локальной САУ предлагается введение корректирующей цепи, которая из воздействия отклонения (динамической ошибки) более инерционного контура управления формирует отклонение задающего воздействия быстродействующего контура. При этом в течение возмущенного переходного процесса в медленнодействующем (первом) контуре $\Delta y_1(z)$ в быстродействующем (втором) контуре возникает воздействие отклонения $\Delta y_2(z)$, которое компенсирует влияние $\Delta y_1(z)$ на P . Так, на рис. 2 показан примерный вид графиков возмущенного процесса медленнодействующего контура и управляемого процесса быстродействующего контура, возникающего при оптимальной межконтурной связи и минимизирующего остаточную ошибку управления по обобщенному параметру.

При исследовании использовались дискретные передаточные функции элементов системы:

$$G_{oy1}(z) = \frac{0.06 \cdot z^{-1}}{1 - 0.05 \cdot z^{-1}} \cdot z^{-10}; \quad G_{oy2}(z) = \frac{0.02 \cdot z^{-1}}{1 - 0.81 \cdot z^{-1}} \cdot z^{-1};$$

$$G_{p1}(z) = \frac{1.6 - 1.3 \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}}; \quad G_{p2}(z) = \frac{2.15 - 1.65 \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}}.$$
(1)

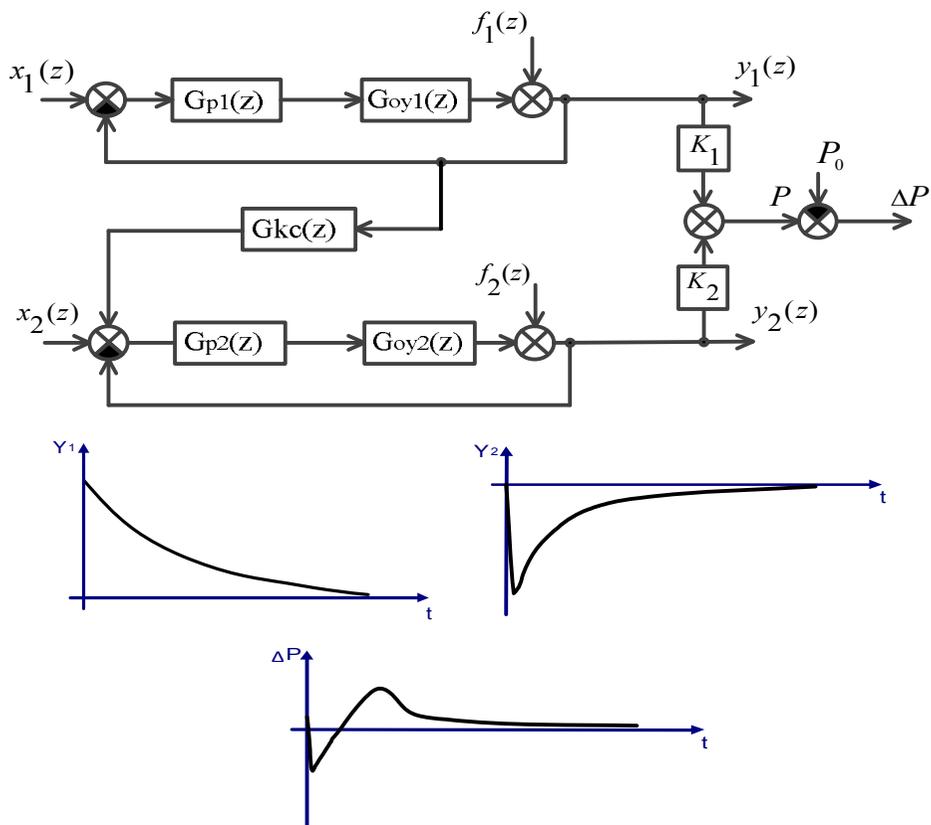


Рис. 2. Двухконтурная САУ с введением корректирующей цепи:
 $G_{kc}(z)$ – передаточная функция корректирующей цепи

В качестве данного примера была взята система управления диаметром и диэлектрической проницаемостью пористой кабельной изоляции, ошибки которых приводят к отклонениям волнового сопротивления кабеля, вызывающим частичные отражения, проходящие по кабелю электромагнитной волны передаваемого сигнала [1]. Если чувствительности обобщенного параметра к частным различны, это может быть учтено путем соответствующей коррекции параметров межконтурной связи на последнем этапе проектирования системы.

Были проведены исследования данной системы при введении различных корректирующих цепей (ПД, ПИД).

Цифровой аналог ПД-регулятора:

$$G(z) = \frac{q_0 + q_1 \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}}, \quad (2)$$

$$\text{где } q_0 = Kp(1 + \frac{T\delta}{T_0}); \quad q_1 = -Kp(1 + \frac{2T\delta}{T_0});$$

$Kp, T\delta$ – параметры непрерывного ПД – регулятора; T_0 – интервал квантования по времени в дискретной САУ.

Цифровой аналог ПИД-регулятора:

$$G(z) = \frac{q_0 + q_1 \cdot z^{-1} + q_2 \cdot z^{-2}}{1 - z^{-1}}, \quad (3)$$

где $q_0 = Kp(1 + \frac{T\delta}{T_0})$; $q_1 = -Kp(1 + \frac{T_0}{T_u} + \frac{2T\delta}{T_0})$; $q_2 = \frac{Kp \cdot T\delta}{T_0}$;

$Kp, T_u, T\delta$ – параметры непрерывного ПИД-регулятора.

На рис. 3, 4 показаны результаты исследования динамических характеристик системы с межконтурными связями различных типов, где параметры схемы (см. рис. 2) K_1 и K_2 приняты единичными.

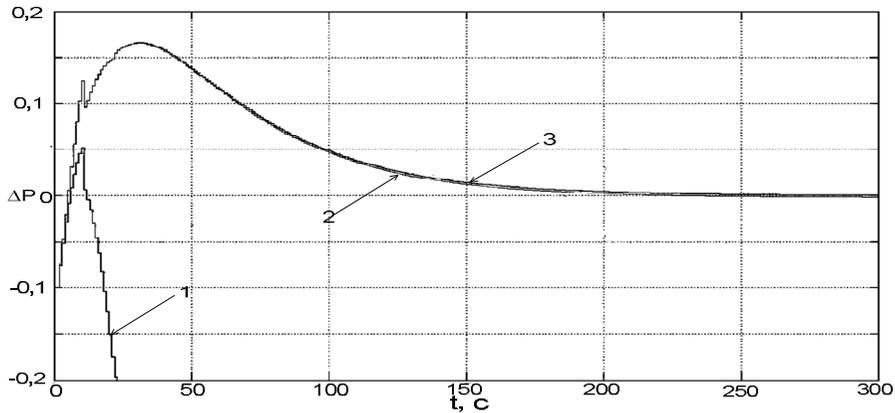


Рис. 3. Переходные процессы по выходу ΔP с применением ПД-корректирующей цепи:

- 1 – переходный процесс с настройками $q_0 = 0,1$, $q_1 = -0,2$;
- 2 – переходный процесс с настройками $q_0 = 0,00105$, $q_1 = -0,002$;
- 3 – переходный процесс с настройками $q_0 = 0,0000105$, $q_1 = -0,000025$

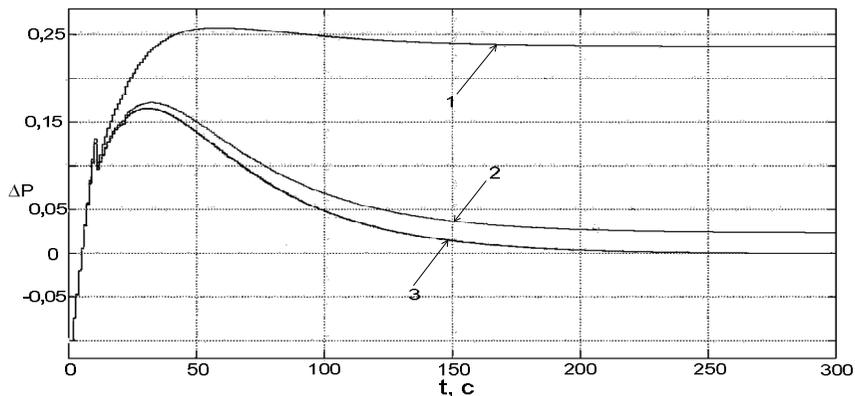


Рис. 4. Переходные процессы по выходу ΔP с применением ПИД-корректирующей цепи:

- 1 – переходный процесс с настройками $q_0 = 0,0101$, $q_1 = 0,019$, $q_2 = 0,00002$;
- 2 – переходный процесс с настройками $q_0 = 0,0011$, $q_1 = 0,0019$, $q_2 = 0,00002$;
- 3 – переходный процесс с настройками $q_0 = 0,00011$, $q_1 = 0,00019$, $q_2 = 0,000002$

Начальные значения настроек q_i были рассчитаны в соответствии с зависимостями (2) и (3), где параметры непрерывных регуляторов были подобраны обеспечивающими устойчивость систем известными методами. Далее все параметры регуляторов подвергались оптимальной настройке методом Гаусса – Зейделя с целью минимизации суммы квадратов ошибки управления.

При анализе рассмотренных выше переходных процессов по выходу ΔP можно сделать следующий вывод. Если требуется сокращение времени переходного процесса по выходу ΔP и можно пренебречь некоторым возрастанием отражения электромагнитной волны в кабеле, то рекомендуется использовать ПИД-корректирующую цепь.

Наиболее эффективным путем минимизации ошибки обобщенного параметра является введение в систему 3-го контура (межконтурной системы координации). Объектом управления третьего контура является описанный уже быстродействующий контур, а источником возмущающего воздействия является медленнодействующий контур (рис. 5). Требуемые динамические характеристики межконтурной связи достигаются оптимизацией параметров вводимого межконтурного регулятора.

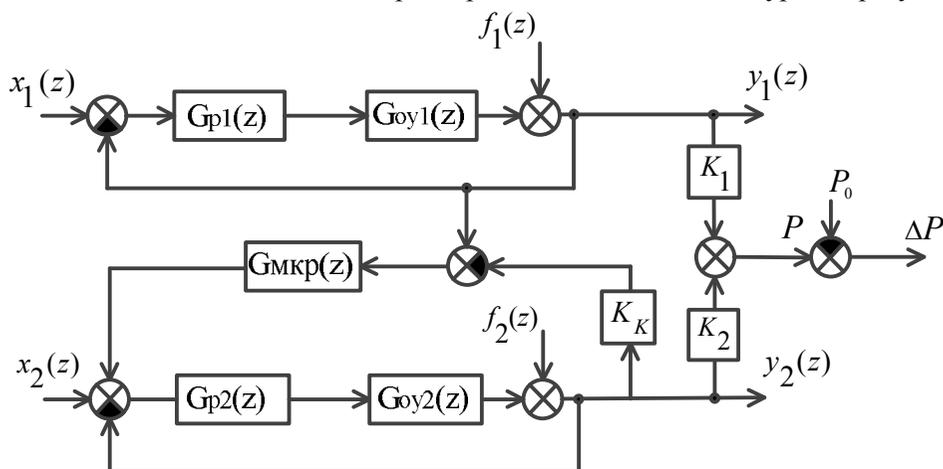


Рис. 5. Двухконтурная система управления обобщенным параметром с введением межконтурной связи:

$G_{mkr}(z)$ – передаточная функция межконтурной цепи;
 K_k – коэффициент коррекции

В качестве регулятора межконтурной системы координации предлагается выбрать ПД или ПИД-регулятор, с которым при появлении скачкообразного возмущающего воздействия в первом контуре обеспечивается компенсация влияния его динамической ошибки на обобщенный параметр P . В системе имеется дополнительный параметр – коэффициент коррекции (K_k), который должен обеспечивать учет возможной разности чувствительностей ΔP к y_1 и y_2 . При этом в отличие от схемы, предложенной в [1], данная система работоспособна и при разных K_1 и K_2 .

Были проведены исследования динамики системы при введении различных межконтурных регуляторов (ПД или ПИД, рассчитываемых по формулам (2), (3), (4) соответственно) на примере локальной САУ автоматической стабилизации частных параметров качества изготавливаемого коаксиального кабеля, когда y_1 – диаметр изоляции D_u и y_2 – диэлектрическая проницаемость ϵ_u . На рис. 6, 7 показаны ре-

зультаты исследования динамических характеристик системы с различными видами регуляторов межконтурной системы.

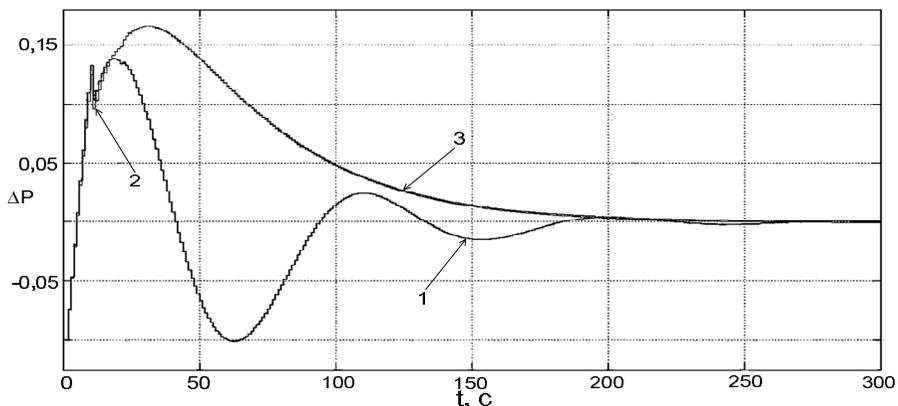


Рис. 6. Переходные процессы по выходу ΔP с применением межконтурного ПД-регулятора:

- 1 – переходный процесс с настройками $q_0 = 0,1$, $q_1 = -0,2$;
- 2 – переходный процесс с настройками $q_0 = 0,00105$, $q_1 = -0,002$;
- 3 – переходный процесс с настройками $q_0 = 0,0000105$, $q_1 = -0,000025$

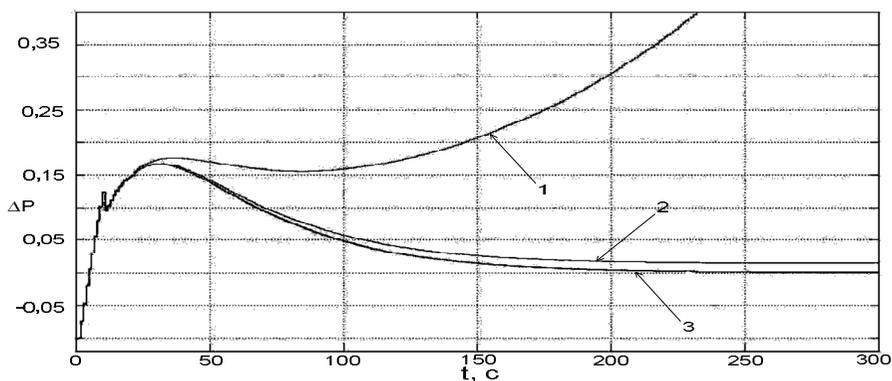


Рис. 7. Переходные процессы по выходу ΔP с применением межконтурного ПИД-регулятора:

- 1 – переходный процесс с настройками $q_0 = 0,00201$, $q_1 = 0,0039$, $q_2 = 0,00004$;
- 2 – переходный процесс с настройками $q_0 = 0,000201$, $q_1 = 0,00039$, $q_2 = 0,000004$;
- 3 – переходный процесс с настройками $q_0 = 0,000003$, $q_1 = 0,0000192$, $q_2 = 0,0000004$

После анализа переходных процессов, изображенных на рис. 6, 7, можно сделать следующие выводы. Если требуется резкое сокращение времени переходного процесса и отражения электромагнитной волны не должны превышать заданных значений, то рекомендуется использовать межконтурный ПД-регулятор (см. рис. 6) с настройками параметров, соответствующими переходному процессу под номером 3. Если отражение электромагнитной волны не должно превышать заданных значений и время переходного процесса должно быть в пределах заданной нормы, то рекомендуется использовать межконтурный ПИД-регулятор (см. рис. 7) с параметрами, соответствующими переходному процессу под номером 2.

Для достижения максимальной эффективности управления в описанной 3-контурной системе следует оптимизировать параметры межконтурной связи.

Оптимизировать межконтурную связь предлагается по интегральному критерию качества – улучшенному интегральному критерию:

$$J = \int_0^{\infty} [e^2(t) + T^2 \dot{y}^2(t)] dt, \quad (4)$$

где $e^2(t) = (y(t) - y_{yem})^2$ – ошибка системы; T^2 – время идеального переходного процесса; $\dot{y}^2(t)$ – скорость изменения управляемого параметра. При реализации межконтурной связи посредством регулятора оптимизации подлежат его параметры, в частности K_p .

Найдем оптимальное значение общего коэффициента регулирования K_p на примере ПИД-регулятора из эквивалентной непрерывной системы. Передаточная функция ПИД-регулятора в непрерывной форме с общим коэффициентом регулирования имеет вид

$$W_{пид}(p) = K_p \frac{T_u p + T_d \cdot T_u p^2 + 1}{T_u p}, \quad (5)$$

где K_p – общий коэффициент регулирования; T_u – постоянная времени интегрирования; T_d – постоянная времени дифференцирования. Начальные значения параметров примем равными $T_u = 0.005c$ и $T_d = 0.002c$.

Для оптимизации регуляторов на имитационной модели системы использовался программный пакет Matlab. Оптимальный переходный процесс изображен на рис. 8 (кривая 3).

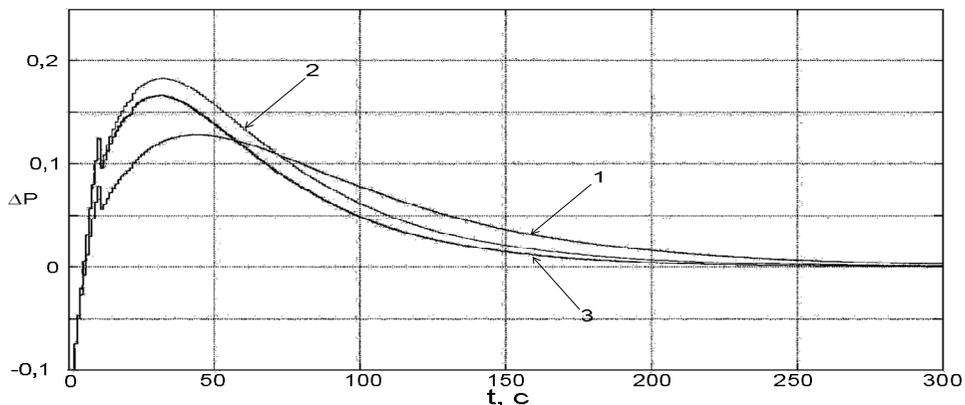


Рис. 8. Сравнение переходных процессов по ошибке системы:

1 – переходный процесс без введения межконтурных связей; 2 – переходный процесс с введением межконтурных связей; 3 – оптимальный переходный процесс с введением межконтурных связей

Оптимальный переходный процесс имеет скачок, что свидетельствует о возможном появлении отражения электромагнитной волны в кабеле.

В заключение можно отметить, что для повышения качества управления следует использовать оптимальные межконтурные связи в виде корректирующих цепей и межконтурных регуляторов, что обеспечивает многократное уменьшение интегральной ошибки управления по обобщенному параметру. А также если чувствительности

обобщенного параметра к частным различны, то следует это учитывать на последнем этапе проектирования системы соответствующей коррекцией параметра межконтурной связи Кк.

Из рис. 8 видно, что введение межконтурной САУ приводит к существенному уменьшению времени возмущенного процесса по обобщенному параметру приблизительно на 20 % при поступлении возмущающего воздействия в медленнодействующий контур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чостковский Б.К.* Методы и системы оптимального управления технологическими процессами производства кабелей связи: Монография. – М.: Машиностроение, 2009. – 190 с.: ил.
2. *Чостковский Б.К.* Моделирование и алгоритмизация процессов управления в стохастических системах с цифровыми регуляторами: Учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2005. – 134 с.
3. Образовательный математический сайт [Электронный ресурс]. Электрон. дан. – М.: 15.03.12. – Режим доступа <http://www.exponenta.ru>, свободный. Загл. с экрана – Яз. рус.

Статья поступила в редакцию 19 сентября 2012 г.

DOUBLE-LOOP CONTROL SYSTEM by GENERALIZED PARAMETER

B.K. Chostkovsky¹, V.Y. Denisov²

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

² State Research-and-Production Space Rocket Centre «TsSKB-Progress»
18, Zemetza st., Samara, 443009

Use of correcting and intercontour circuits with application of various kinds of correction and regulators in double-loop control system by generalized parameter is considered. Various methods of intercontour connection optimization are investigated.

Keywords: multiloop system, generalized parameter, regulator optimization of intercontour coordination system, correcting circuit, intercontour regulators.