

Системный анализ, управление и автоматизация

УДК 681.3

МЕТОД АНАЛИЗА РИСКА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Ф.Ф. Буканов, В.Н. Ворожейкин

Самарский государственный технический университет

443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: esib@samgtu.ru

Предлагается метод анализа риска при обеспечении безопасности промышленного предприятия. Указанный метод базируется на вероятностном подходе при оценке риска и использовании статистических данных по отказам элементов систем и подсистем, как технических, так и физических. Предлагаемый метод использует теорию графов, т. е. построение деревьев отказов и деревьев событий.

Ключевые слова: метод, анализ, риск, предприятие, угроза, информация, безопасность, система, подсистема, отказ, статистика, данные, преступник, модели, граф, вероятность, эффективность, защита.

Известные исследования анализа риска охватывают не только вопросы безопасности и надежности технических систем, но и практически все аспекты действий человека во взаимодействии с техническими системами при решении задач обеспечения безопасности сложных объектов.

Данные исследования не потеряли актуальности и в наши дни, так как сохраняется тенденция развития информационных технологий во всех сферах деятельности человека, с которой средства и системы обеспечения безопасности находятся в противоречии. Необходимо учитывать также и то, что для обеспечения безопасности предприятия используется достаточно большая номенклатура технических, программно-аппаратных средств, человеческих ресурсов, которые имеют свою степень надежности функционирования, то есть имеется вероятность отказов, которая может быть определена из статистических данных.

Все вышесказанное требует постоянной оценки эффективности и надежности средств и систем обеспечения безопасности предприятия.

Решение этой задачи может быть осуществлено с помощью методов определения уровня риска совершения для каждой из угроз безопасности предприятия.

Основополагающими работами в области теории анализа риска является работы [1-4], в них системно изложены общие вопросы анализа (идентификация, оценка, прогноз, приемлемость) рисков, а также управления (принятие решения и обоснованность мер) рисками для различных объектов.

Федор Федорович Буканов (к.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Электронные системы и информационная безопасность».

Владимир Николаевич Ворожейкин (к.т.н.), доцент кафедры «Электронные системы и информационная безопасность».

В то же время в силу общей направленности данных работ в них вопросы разработки методов и алгоритмов анализа рисков безопасности объектов затрагивались частично.

Анализ известных методов, алгоритмов и моделей, изложенных в работах [5-8], показал, что пока не существует теоретически и практически обоснованных подходов к анализу риска потери промышленными предприятиями материальных и нематериальных активов исходя из отказов элементов и подсистем системы безопасности предприятия.

Учитывая вышесказанное, сформулируем следующую задачу анализа риска безопасности промышленного предприятия.

При заданных:

– модели предприятия, включающей описание объектов его функционирования, схем их расположения, построения и режимов работы;

– модели построения и работы систем безопасности предприятия – провести анализ риска потери конфиденциальной информации при несанкционированном доступе для случаев отказа элементов и подсистем безопасности предприятия; определить наиболее вероятную модель преступника из числа заданных и наиболее уязвимого места в системе безопасности предприятия.

Предлагаемый в данной работе метод анализа риска для сформулированной выше задачи базируется на вероятностном подходе при оценке риска и использовании статистических данных по отказам элементов систем и подсистем, как технических, так и физических, других элементов технической инфраструктуры, которые могут привести к реализации угрозы безопасности предприятия. Предлагаемый метод базируется на теории графов, т. е. построении деревьев отказов и деревьев событий. Построение дерева отказов начинается с определенного конечного состояния системы безопасности предприятия.

Реализация предлагаемого метода анализа риска обеспечения безопасности предприятия может быть осуществлена с использованием следующего алгоритма:

- шаг 1. Составляется перечень угроз безопасности предприятия с экспертными оценками материальных потерь при реализации этих угроз.
- шаг 2. Проводится экспертная оценка критического уровня материальных потерь предприятия от реализации одиночной угрозы.
- шаг 3. Составляется база данных из угроз безопасности предприятия A_i ($i=1 \div n$), реализация которых может превысить критический уровень материальных потерь предприятия.
- шаг 4. Из базы данных выбирается угроза A_i , которая в дальнейшем будет исследоваться методом анализа риска.
- шаг 5. Составляется модель предприятия (территория, здания, цеха и другие элементы инфраструктуры).
- шаг 6. Определяются рубежи защиты предприятия техническими системами и средствами, человеческими ресурсами от проникновения преступника на территорию, в здание, цеха, комнаты, компьютерные сети с целью реализации A_i угрозы.
- шаг 7. Составляется перечень систем и подсистем безопасности с привязкой к рубежам защиты, других технических систем инфраструктуры с привязкой к территории предприятия, а также человеческих ресурсов, отказ которых может повлиять на реализацию A_i угрозы безопасности предприятия.
- шаг 8. Составляются возможные модели преступника с указанием крайнего ру-

бежа защиты предприятия, до которого он имеет санкционированный доступ.

- шаг 9. Для каждой модели преступника начиная с рубежа защиты, от которого он не имеет санкционированного доступа на объекты предприятия, строится граф – дерево отказов систем и подсистем безопасности, инфраструктуры предприятия, человеческих ресурсов, которые могут привести к реализации A_i угрозы.
- шаг 10. Для каждой ветви дерева отказов на основе статистических данных определяется вероятность реализации угрозы A_{ik} , зависящая от вероятности отказов систем и подсистем, находящихся последовательно в цепочке на конкретной ветви дерева отказов

$$P_{A_{ik}} = P_{B_1} \cdot P_{B_2} \cdot \dots \cdot P_{B_j} \cdot \dots \cdot P_{B_m},$$

где $k = 1 \div r$ – номер конкретной ветви дерева отказов; $P_{A_{ik}}$ – вероятность реализации угрозы A_i для конкретной ветви дерева отказов;

$B_1, B_2, \dots, B_j, \dots, B_m$ – событие отказов систем и подсистем, находящихся последовательно в цепочке на конкретной ветви дерева отказов;

$P_{B_1}, P_{B_2}, \dots, P_{B_j}, \dots, P_{B_m}$ – вероятность отказов систем и подсистем, находящихся последовательно в цепочке на конкретной ветви дерева отказов.

- шаг 11. Проводится сравнительный анализ вероятности A_i для различных ветвей $k = 1 \div r$ дерева отказов и определяется наибольшее значение $P_{A_{ik}}$.
- шаг 12. Для ветвей дерева отказов с наибольшими значениями $P_{A_{ik}}$ проводятся работы по повышению работоспособности и надежности систем и подсистем безопасности, инфраструктуры, человеческих ресурсов предприятия.
- шаг 13. Аналогично проводятся действия предполагаемого алгоритма метода анализа риска для всех угроз безопасности, находящихся в базе данных (см. шаг 3 алгоритма).

Проведем анализ риска угрозы безопасности виртуального промышленного предприятия, используя приведенный выше алгоритм.

В качестве упрощенной модели предприятия примем следующее.

Пусть предприятие состоит из следующих элементов:

- охраняемая территория, проходные, ворота для въезда и выезда транспорта;
- несколько зданий – цеха по изготовлению и выпуску сложной продукции, содержащей элементы ноу-хау и подлежащей информационной защите;
- здание конструкторского бюро с закрытой локальной вычислительной сетью для проектирования новых образцов продукции, содержащей базы данных ноу-хау;
- инженерная инфраструктура промышленного предприятия.

В качестве угрозы безопасности предприятия A_i примем похищение преступником конфиденциальной информации, содержащей ноу-хау о продукции, производимой на предприятии.

Согласно модели предприятия можно выделить следующие рубежи защиты предприятия:

- охраняемая территория, проходные, ворота для въезда и выезда транспорта – рубеж защиты № 1;
- периметры и входы-выходы зданий – цехов, конструкторского бюро – рубеж защиты № 2;
- входы-выходы закрытых помещений – рубеж защиты № 3;

- входы-выходы помещений системы энергоснабжения предприятия – рубеж защиты № 4.

В качестве приближенной модели системы информационной безопасности рассматриваемого выше промышленного предприятия будем рассматривать следующий ее состав:

- подсистема № 1 охраны периметра;
- подсистема № 2 режима пропуска людей и техники на территорию предприятия и с нее;
- подсистема № 3 режима пропуска людей в здание конструкторского бюро;
- подсистема № 4 режима пропуска людей в цеха предприятия;
- подсистема № 5 охраны помещений, имеющих элементы локальной вычислительной сети;
- подсистема № 6 защиты закрытых помещений от утечки конфиденциальной информации по техническим каналам;
- подсистема № 7 защиты локальной вычислительной сети, защищающей обрабатываемую конфиденциальную информацию от несанкционированного доступа;
- подсистема № 8 охраны помещений с конфиденциальной информацией;
- подсистема № 9 защиты системы электроснабжения предприятия от выхода ее из строя.

На базе изложенных упрощенных моделей предприятия, системы обеспечения информационной безопасности, а также выделенных рубежей защиты строим дерево возможных отказов систем и подсистем безопасности предприятия. Под отказами будем понимать не только полные отказы систем и подсистем безопасности предприятия, но и сбои в работе этих средств. На рисунке изображено дерево отказов систем и подсистем безопасности предприятия для следующих моделей преступника – похитителя информации:

- преступник – не работник предприятия (модель № 1);
- преступник – не работник предприятия, но имеет доступ на территорию предприятия, в конструкторское бюро (представитель заказчика или соисполнитель) и не имеет доступа в закрытые помещения (модель № 2);
- преступник – работник предприятия, имеющий доступ в цеха, конструкторское бюро, но не имеющий доступа в закрытые помещения (модель № 3);
- преступник – работник предприятия, имеющий доступ в цеха, конструкторское бюро, закрытые помещения, к закрытой локальной вычислительной сети.

Проведем анализ дерева отказов на предмет выявления возможных путей движения преступника к конфиденциальной информации, учитывая при этом, какие системы и подсистемы безопасности должны выйти из строя, чтобы он решил свою задачу.

Для модели преступника № 1 возможны следующие варианты цепочек отказов систем и подсистем безопасности, которые могут обеспечить ему получение конфиденциальной информации, т. е. привести к реализации рассматриваемой угрозы:

– вариант 1 (модель № 1): подсистема № 1 (P_1) → подсистема № 4 (P_4) → подсистема № 8 (P_8);

– вариант 2 (модель № 1): подсистема № 1 (P_1) → подсистема № 3 (P_3) → подсистема № 8 (P_8);

– вариант 3 (модель № 1): подсистема № 1 (P_1) → подсистема № 9 (P_9);

– вариант 4 (модель № 1): подсистема № 1 (P_1) → подсистема № 3 (P_3);



Дерево отказов систем и подсистем безопасности предприятия

- вариант 5 (модель № 1): подсистема № 1 (P_1) → подсистема № 3 (P_3) → подсистема № 5 (P_5) → подсистема № 7 (P_7);
 - вариант 6 (модель № 1): подсистема № 2 (P_2) → подсистема № 4 (P_4) → подсистема № 8 (P_8);
 - вариант 7 (модель № 1): подсистема № 2 (P_2) → подсистема № 3 (P_3) → подсистема № 8 (P_8);
 - вариант 8 (модель № 1): подсистема № 2 (P_2) → подсистема № 9 (P_9);
 - вариант 9 (модель № 1): подсистема № 2 (P_2) → подсистема № 3 (P_3) → подсистема № 5 (P_5) → подсистема № 6 (P_6);
 - вариант 10 (модель № 1): подсистема № 2 (P_2) → подсистема № 3 (P_3) → подсистема № 7 (P_7),
- где P_i , $i = 1 \div 9$ – вероятности отказов рассматриваемых систем и подсистем безопасности.

Для модели преступника № 2 возможны следующие варианты цепочек отказов систем и подсистем безопасности, которые могут привести к реализации рассматриваемой угрозы:

- вариант 1 (модель № 2): подсистема № 4 (P_4) → подсистема № 8 (P_8);
- вариант 2 (модель № 2): подсистема № 3 (P_3) → подсистема № 8 (P_8);
- вариант 3 (модель № 2): подсистема № 3 (P_3) → подсистема № 5 (P_5) → подсистема № 6 (P_6);
- вариант 4 (модель № 2): подсистема № 3 (P_3) → подсистема № 5 (P_5) → подсистема № 7 (P_7);

стема № 7 (P_7);

– вариант 5 (модель № 2): подсистема № 9 (P_9).

Для модели преступника № 3 варианты цепочек отказов аналогичны таковым для модели преступника № 2.

Для получения преступником конфиденциальной информации при использовании модели преступника № 4 отказы систем и подсистем безопасности не требуются.

При наличии статистических данных по отказам систем и подсистем безопасности можно количественно оценить вероятность отказа всей цепочки любого варианта для любой модели преступника. Например, для варианта № 1 модели преступника № 1 вероятность потери конфиденциальной информации будет составлять

$$P_{\text{вариант1}}^{\text{модель№1}} = P_1 P_4 P_8,$$

а для варианта № 1 модели преступника № 2

$$P_{\text{вариант1}}^{\text{модель№2}} = P_4 P_8.$$

Сравнивая вероятности отказов возможных цепочек систем и подсистем безопасности для различных моделей преступников, мы можем определить наиболее вероятную модель действий преступника, наиболее уязвимые места в системе безопасности предприятия и исходя из этого выбрать варианты решений задачи повышения эффективности защиты конфиденциальной информации.

Предлагаемый метод анализа риска обеспечения безопасности предприятия универсален и может быть использован для различных угроз безопасности при любой сложности моделей предприятия, моделей систем безопасности, моделей преступников.

Таким образом, в результате данной работы:

- сформулирована в новой постановке задача анализа риска безопасности предприятия, отличающаяся от ранее известных в решении проблемы анализа совместного влияния модели преступника и отказа элементов, подсистем системы безопасности на вероятность потери конфиденциальной информации;
- предложен метод решения данной задачи, который базируется на вероятностном подходе при оценке риска и теории графов с использованием статистических данных по отказам элементов и подсистем системы безопасности предприятия;
- предложен алгоритм реализации данного метода;
- проведена апробация предложенного алгоритма в целях анализа риска потери конфиденциальной информации для виртуального промышленного предприятия;
- в результате апробации алгоритма получены зависимости вероятности потери конфиденциальной информации от вероятностей отказов элементов, подсистем системы безопасности для заданных моделей действия преступника.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Катулев А.Н., Северцев Н.А, Соломаха Г.М.* Исследование операций и обеспечение безопасности: прикладные задачи: Учеб. пособие. – М.: Физматлит, 2005. – 240 с.
2. *Костогрызов А.И., Степанов П.В.* Инновационное управление качеством и рисками в жизненном цикле систем. – М.: Изд-во ВПК, 2008. – 404 с.
3. *Шоломицкий А.Г.* Теория риска. Выбор при неопределенности и моделирование риска. – М.: Изд-во ГУ ВШЭ, 2005. – 121 с.
4. *Прохоров С.А., Федосеев А.А., Иващенко А.В.* Автоматизация комплексного управления безопасностью предприятия. – Самара: СНЦ РАН, 2008. – 55 с., ил.
5. *Васильева Т.Н., Львова А.В., Хорьков С.Н.* Применение оценок рисков при защите от реальных

- угроз информационной безопасности // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: Труды XVII Международного научно-технического семинара, Алупшта, 2008. – СПб.: ГУАП, 2008.
6. *Платонов А.П.* Разработка имитационных систем для анализа рисков на производственных предприятиях // Вестник Челябинского государственного университета. Вып. Экономика. – 2010. – № 3 (184). – С. 101-105.
 7. *Плетев П.В., Белов В.М.* Методика оценки рисков информационной безопасности на предприятиях малого и среднего бизнеса // Доклады ТУСУРа, № 1 (25). Ч. 2, 2012.
 8. *Семенов А.К.* Мониторинг системы рисков промышленного предприятия // Материалы V Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы развития территорий и систем регионального и муниципального управления». Вып. 3 / Под ред. Ю.В. Вертакова. – Курск: КГТУ, 2010. – С. 98-102.

Статья поступила в редакцию 13 июня 2013 г.

RISK ANALYSIS METHOD FOR ENSURING THE SAFETY OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

F.F. Bukanov, V.N. Vorozheikin

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

A method of risk analysis while ensuring the safety of an industrial enterprise is offered. The method in question is based on the probabilistic approach in risk assessment, and the use of statistical data on failures of system and sub-system components, both technical and physical. The proposed method uses the graph theory, i. e. drawing fault and event trees.

Keywords: *method, analyze, risk, enterprise, threat information, security, system, subsystem, refusal, statistics, data, criminal, model, graph, probability, efficiency, protection.*

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УНИКАЛЬНОСТИ ФРАГМЕНТОВ ЭЛЕКТРОННОЙ КАРТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ¹

Л.А. Демидова², Г.Н. Мятлов³

²Рязанский государственный радиотехнический университет
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

³Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Рассмотрена проблема оценки уникальности фрагментов электронной карты с применением в качестве характеристики уникальности среднеквадратического отклонения, вычисляемого на основе классической линейной регрессии. Показана целесообразность использования для оценки уникальности фрагментов электронной карты дополнительных характеристик. Предложен подход к оценке уникальности фрагментов электронной карты, основанный на применении нечеткой линейной регрессии с асимметричными параметрами треугольных функций принадлежности, обеспечивающий выполнение более точной дифференциации фрагментов электронной карты посредством введения дополнительных характеристик уникальности. Предложена методика сравнения уникальных фрагментов электронной карты с использованием нечетких мер подобия.

Ключевые слова: уникальный фрагмент, электронная карта, нечеткая линейная регрессия, нечеткая мера подобия.

Введение

Одной из важных задач, решаемых геостационарными космическими системами наблюдения Земли, является задача привязки изображений по электронным картам (ЭК) в процессе периодической съемки земного диска, содержащего одну и ту же часть поверхности Земли. При этом в качестве опорной координатной основы используются уникальные фрагменты (изломы береговых линий океанов, морей и крупных озер, контуры крупных островов), которые хорошо различимы на изображениях от геостационарных спутников, имеют специфичную геометрическую форму, характеризуются высокой временной устойчивостью и в большинстве ЭК выделены в отдельный слой [1, 2].

Определение параметров координатной привязки по ЭК реализуется путем последовательного выполнения следующих четырех этапов:

- выделение на снимке и карте уникальных фрагментов;
- формирование на основе уникальных фрагментов бинарных масок в виде уникальной линии карты, расширенной с одной стороны областью с единичными элементами яркости (что соответствует суше), а с другой стороны – областью с нулевыми элементами (что соответствует водной поверхности);

¹ Работа подготовлена при поддержке РФФИ проект №-01-12014 «офи_м»

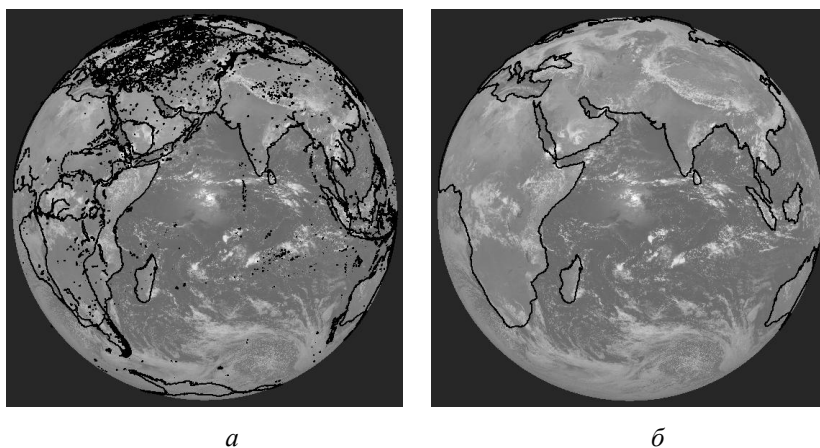
Лилия Анатольевна Демидова (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Вычислительная техника и прикладная математика».

Геннадий Николаевич Мятлов (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

- выполнение корреляционного поиска одноименных фрагментов на снимке, которые наиболее близки к маске по геометрии и яркостному перепаду;
- установление на основе множества найденных опорных точек местности геометрического соответствия изображения на снимке и ЭК.

Теоретическая часть

Для поиска одноименных фрагментов снимок и ЭК должны отображаться в единой проекции. Векторная ЭК представляет собой множество M множеств E^j , $j = \overline{1, M}$, каждое из которых состоит из I пар некоторым образом упорядоченных географических координат $-E^j = \{(\varphi_i, \lambda_i)\}; i = \overline{1, I}$. Такие множества задают пространственные объекты и сопровождаются информацией о типе объекта (например, тип – «береговая линия») и о его характеристиках (площадь S_o , периметр P_o , географический регион Ω_o). Так как исходная ЭК представляет объекты всего земного шара, то выполняется преобразование (фильтрация) исходного множества объектов ЭК. Сначала осуществляется выделение тех объектов ЭК из географического региона Ω_o , которые попадают в заданный локальный регион Ω : $E \rightarrow E_1 = \{E^j : \mathfrak{R}(\Omega_o, \Omega)\}$, где $\mathfrak{R}(\Omega_o, \Omega)$ – оператор выбора объекта ЭК в регионе Ω_o , попадающего в заданный локальный регион Ω . Затем осуществляется формирование нового множества E_2 объектов ЭК путем удаления из E_1 объектов (чаще всего это малоразмерные объекты), не содержащихся на изображениях диска Земли: $E_1 \rightarrow E_2 = \{E_1 : \mathfrak{R}(S_o, S)\}$, где $\mathfrak{R}(S_o, S)$ – оператор удаления малоразмерных объектов, чья площадь S_o удовлетворяет условию: $S_o \leq S$, где S – пороговое значение площади объекта. И, наконец, выполняется координатное преобразование элементов E_1 множества E_2 в систему координат (Oxy) , в которой регистрируются изображения ($[x]=\text{пиксел}$, $[y]=\text{пиксел}$): $E_2 \rightarrow E_3; E_3 = \{K(x_i, y_i)\}; i = \overline{1, I}$, где $K(x_i, y_i)$ - оператор координатных преобразований. Пересчет координат (φ, λ) выполняется по формулам преобразования в нормализованную геостационарную проекцию [3].



a

б

Рис. 1. Преобразование ЭК:

a – объекты исходного множества E ; *б* – объекты множества E_3

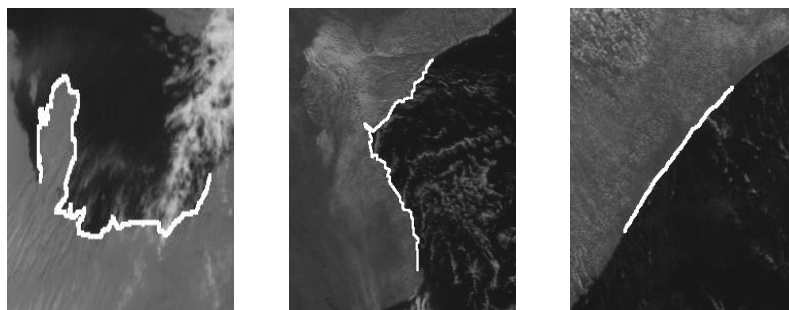
На рис. 1, *а* и 1, *б* представлены соответственно все объекты исходного множества E и объекты множества E_3 , полученного в результате фильтрации объектов множества E .

На основе преобразованной ЭК выделяются уникальные фрагменты береговых линий. Размеры фрагментов выбираются исходя из двух условий [1]:

- размеры должны быть достаточно большими для их надежного сопоставления с одноименными объектами снимка;
- размеры нельзя неограниченно увеличивать, так как начинают негативно сказываться взаимные искажения между одноименными объектами снимка и ЭК.

Экспериментально установлено, что прямоугольная область, включающая уникальный фрагмент, должна иметь размеры порядка 100×100 пикселей. Под уникальностью фрагмента ЭК понимается его неповторяемость, выражающаяся в характерной изломанности.

Определение уникальных фрагментов ЭК может быть выполнено как с участием оператора, так и автоматически. В первом случае оператор указывает начальную и конечную точки фрагмента, на основании которых формируется уникальный фрагмент ЭК. Автоматическое формирование уникальных фрагментов выполняется по следующему алгоритму.



а *б* *в*
Рис. 2. Примеры уникальных (*а*, *б*) и неуникальных (*в*) фрагментов ЭК

1. Для каждой точки некоторого объекта карты $E_3 = \{ (x_i, y_i); i = \overline{1, I} \}$ формируются участки $D_i (i = \overline{1, I})$ путем последовательного включения других точек объекта до тех пор, пока размер S_{D_i} сформированного участка $D_i = \{ (x_j, y_j); j = \overline{1, J} \} (J \leq I; i = \overline{1, I})$ не станет больше порога S_p .

2. Для каждого участка D_i по методу наименьших квадратов исходя из условия:

$$\sum_{j=1}^J (b+kx_j - y_j)^2 \rightarrow \min \quad (\text{или} \quad \sum_{j=1}^J (b+ky_j - x_j)^2 \rightarrow \min)$$

вычисляются параметры k и b уравнения классической линейной регрессии (КЛР), а затем находится средне-

квадратическое отклонение (СКО) невязок $\sigma_i = ((1/J) \sum_{j=1}^J (y_j - (b+kx_j))^2)^{1/2}$ (или

$\sigma_i = ((1/J) \sum_{j=1}^J (x_j - (b+ky_j))^2)^{1/2}$) по отношению к КЛР, которое и является мерой

уникальности.

3. Искомое множество D^* уникальных фрагментов формируется в виде $D \rightarrow D^* = \{D_i : \sigma_i > \sigma_p, i = \overline{1, I}\}$, где σ_p – пороговое значение меры уникальности.

При пороге $\sigma_p = 30$ на изображении, представленном на рис. 1,б, можно выделить 63 уникальных фрагмента, расположенных по всей поверхности земного диска.

На рис. 2 представлены примеры двух уникальных фрагментов (а: $\sigma = 40$; б: $\sigma = 33$) и одного неуникального фрагмента (в: $\sigma = 5$).

Для каждого фрагмента $D_i (i = \overline{1, I})$ формируется набор бинарных масок $A_i (i = \overline{1, I})$ в виде «коридоров» с равноудаленными границами от линии карты. Для этого сначала осуществляется векторно-растровое преобразование фрагмента $D_i (i = \overline{1, I})$ в плоскость регистрируемого изображения, а затем выполняется его утолщение таким образом, чтобы осевая линия «коридора» являлась линией ЭК. Элементам, находящимся по одну сторону осевой линии, включая и ее, присваивается единичная яркость, а элементам, расположенным по другую сторону – нулевая яркость, что соответствует более светлой суше и более темной водной поверхности. Такие «коридоры» позволяют учесть как топологию береговых линий, так и взаимное расположение водной и земной поверхностей. Для увеличения надежности совмещения фрагмента снимка и маски формируется набор бинарных масок с разной шириной «коридора». По результатам совмещения снимка с бинарными масками с различной шириной «коридора» в качестве окончательного принимается решение, при котором достигается максимум меры схожести (коэффициента корреляции).

На рис. 3 представлены примеры формирования бинарных масок с различной шириной «коридора».

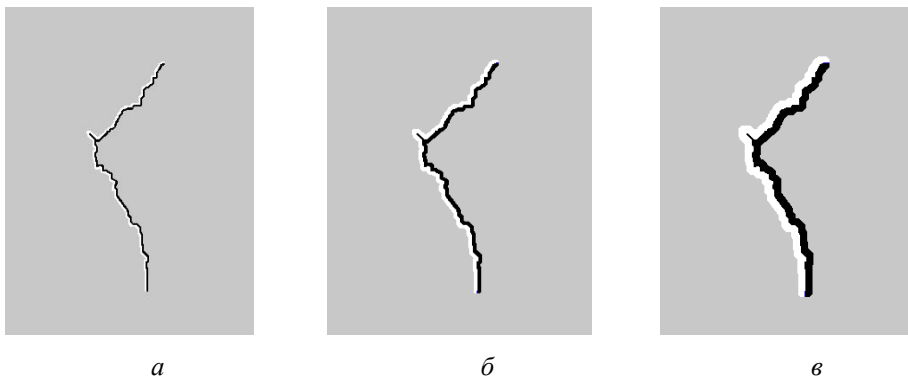


Рис. 3. Примеры бинарных масок с различной шириной «коридора»: 2 пикселя (а), 4 пикселя (б) и 8 пикселей (в)

Как показывает анализ, применение только одной характеристики – среднеквадратического отклонения σ_i – для описания уникальности фрагмента ЭК приводит к тому, что фрагменты, имеющие одинаковые (близкие) значения меры уникальности σ_i , будут отнесены к одному классу (группе) фрагментов. Однако, вообще говоря, можно сформировать большое количество фрагментов $D_i (i = \overline{1, I})$ ЭК, имеющих не только одинаковые значения меры уникальности σ_i , но и одинаковые значения длин

своих ломаных l , при этом существенно отличающихся друг от друга по своей форме.

В связи с этим при оценке уникальности фрагментов ЭК предлагается использовать дополнительные характеристики уникальности фрагментов ЭК. Получение дополнительных характеристик уникальности фрагментов ЭК может быть реализовано с использованием уравнения нечеткой линейной регрессии (НЛР) с асимметричными параметрами треугольных функций принадлежности (ТФП) [5], что позволит благодаря учету асимметричных параметров используемых ТФП адекватно дифференцировать фрагменты D_i ($i = \overline{1, T}$) ЭК, имеющие близкие значения меры уникальности σ_i . Использование ТФП с асимметричными параметрами (в отличие от случая использования ТФП с симметричными параметрами) обеспечит не только вычисление значения меры уникальности σ_i , равное значению, получаемому с помощью уравнения КЛР (рис. 4,а), но и позволит определить «коридор» уравнения НЛР посредством введения в решение задачи асимметричного треугольного нечеткого числа (L - R)-типа, описываемого тройкой параметров $T = (a, c, d)_{\text{ТНЧ}}$, с функцией принадлежности $u_T(x)$ вида [4]

$$u_T(x) = \begin{cases} 1 - (a - x)/c, & \text{если } a - c \leq x < a; \\ 1 - (x - a)/d, & \text{если } a \leq x < a + d; \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (1)$$

где a – модальное значение (ядро) треугольного нечеткого числа (ТНЧ); c и d – левый и правый параметры (размах) нечеткости соответственно.

Носителем ТНЧ является интервал $(a - c - c + d)$. При $c = d$ ТНЧ является симметричным, при $c \neq d$ – асимметричным.

Уравнение НЛР в задаче оценки уникальности фрагмента ЭК может быть записано как

$$y(x) = T_0 + T_1 \cdot x = (a_0, c_0, d_0)_{\text{ТНЧ}} + (a_1, c_1, d_1)_{\text{ТНЧ}} \cdot x, \quad (2)$$

где $T_0 = (a_0, c_0, d_0)_{\text{ТНЧ}}$ и $T_1 = (a_1, c_1, d_1)_{\text{ТНЧ}}$ – треугольные нечеткие числа, описывающие параметры, соответствующие параметрам b и k уравнения КЛР.

Введем дополнительные обозначения для унификации формулировки задачи поиска оптимальных значений параметров уравнения НЛР вида (2).

Пусть $x_j = (x_{j,0}, x_{j,1})$ ($j = \overline{1, J}$), при этом все $x_{j,0} = 1$, так как соответствуют параметру b (свободному члену уравнения КЛР).

Задача поиска оптимальных значений параметров уравнения НЛР обычно решается как задача линейного программирования (ЗЛП) при равных (симметричных) значениях параметров $c = d$ ТФП в виде [4]

$$F_{\text{ЗЛП}} = \sum_{j=1}^J \sum_{i=0}^n c_i x_{ji} \rightarrow \min_{a,c} \quad (3)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=0}^n a_i x_{ji} + (1 - \alpha) \sum_{i=0}^n c_i x_{ji} \geq y_j; \quad (4)$$

$$\sum_{i=0}^n a_i x_{ji} - (1 - \alpha) \sum_{i=0}^n c_i x_{ji} \leq y_j; \quad (5)$$

$$c_i \geq 0; (j = \overline{1, J}; i = \overline{0, n}; n = 1), \quad (6)$$

где α – значение α -уровня ТНЧ ($\alpha \in [0, 1]$); в случае, если не оговорено иначе, целесообразно использовать $\alpha = 0$).

Однако такая формулировка оптимизационной задачи обеспечивает нахождение симметричных параметров ТФП, что приводит к недостаточно адекватному определению параметров уравнения НЛР (и, как следствие, к недостаточно точному учету геометрического расположения данных); кроме того, не гарантирует получение значения среднеквадратического отклонения σ_i , близкого к значению среднеквадратического отклонения σ_i , получаемого с помощью уравнения КЛР. Для устранения данного недостатка целесообразно выполнить формулировку оптимизационной задачи, используя асимметричные параметры ТФП и, кроме того, модифицировать саму целевую функцию.

Исходя из вышесказанного задача поиска оптимальных значений параметров $T_0 = (a_0, c_0, d_0)_{ТНЧ}$ и $T_1 = (a_1, c_1, d_1)_{ТНН}$ уравнения НЛР может быть сформулирована как задача квадратичного программирования (ЗКП) в виде [4]

$$F_{ЗКП} = k_1 \sum_{j=1}^J (y_j - \sum_{i=0}^n a_i x_{ji})^2 + k_2 (1 - \alpha) \sum_{j=1}^J \sum_{i=0}^n (c_i + d_i) x_{ji} + \xi \sum_{i=1}^n (c_i^2 + d_i^2) \rightarrow \min_{a, c, d} \quad (7)$$

при ограничениях

$$\sum_{i=0}^n a_i x_{ji} + (1 - \alpha) \sum_{i=0}^n d_i x_{ji} \geq y_j; \quad (8)$$

$$\sum_{i=0}^n a_i x_{ji} - (1 - \alpha) \sum_{i=0}^n c_i x_{ji} \leq y_j; \quad (9)$$

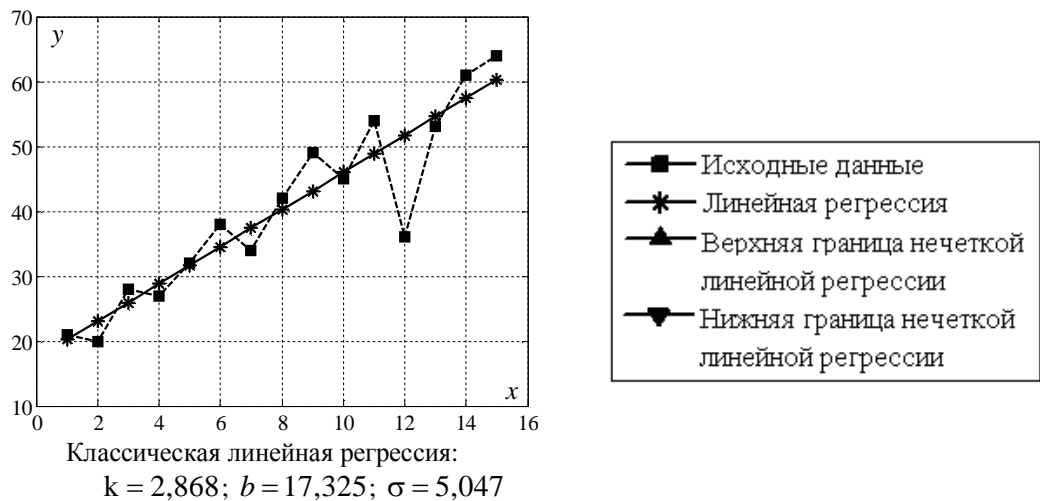
$$c_i \geq 0; d_i \geq 0 (j = \overline{1, J}; i = \overline{0, n}; n = 1), \quad (10)$$

где α – значение α -уровня ТНЧ ($\alpha \in [0, 1]$); k_1, k_2 – весовые коэффициенты, характеризующие вклад первого и второго слагаемых в целевую функцию вида (7); ξ – малое положительное число такое, что $k_1, k_2 \gg \xi$.

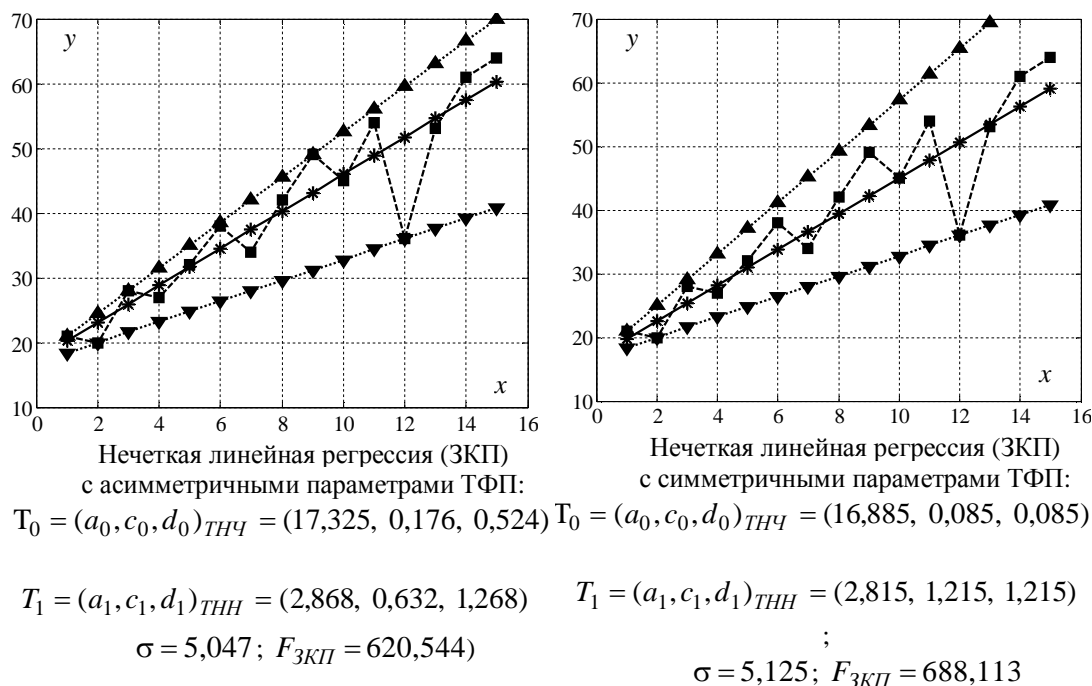
В этом случае функция принадлежности произвольной точки данных (x', y') ($x' = (x'_0, x'_1)$; $x'_0 = 1$) уравнению НЛР может быть определена как [4]

$$u(x', y') = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{i=0}^n a_i x'_i - y'}{\sum_{i=0}^n c_i x'_i}, & \sum_{i=0}^n (a_i - c_i) x'_i \leq y' \leq \sum_{i=0}^n a_i x'_i; \\ 1 - \frac{y - \sum_{i=0}^n a_i x'_i}{\sum_{i=0}^n d_i x'_i}, & \sum_{i=0}^n a_i x'_i \leq y' \leq \sum_{i=0}^n (a_i + d_i) x'_i; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (11)$$

На рис. 4,б-в приведены соответственно примеры НЛР с асимметричными и симметричными параметрами ТФП, полученных на основе одинаковых исходных наборов данных.



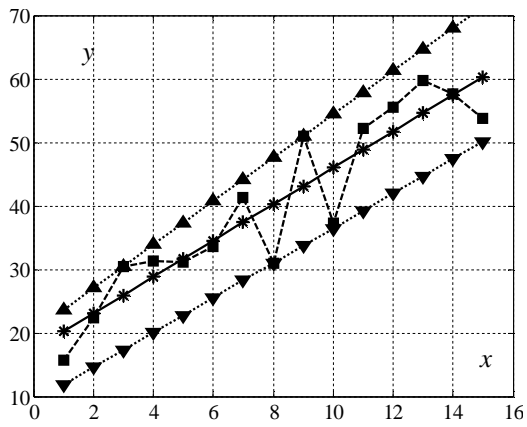
a



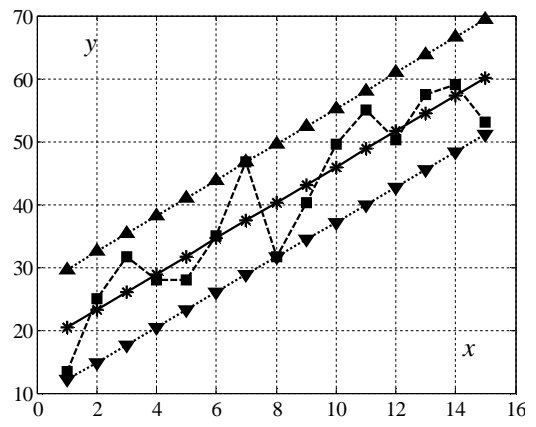
б

в

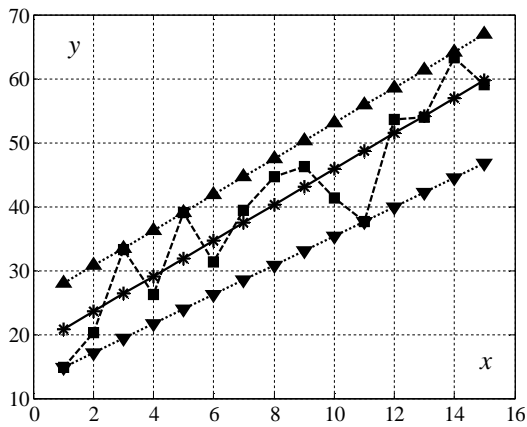
Рис. 4. Примеры регрессий



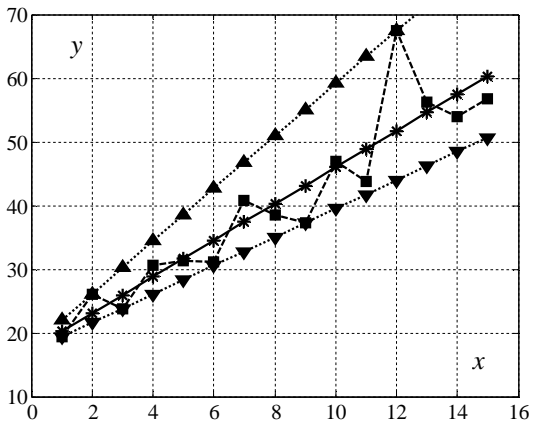
a



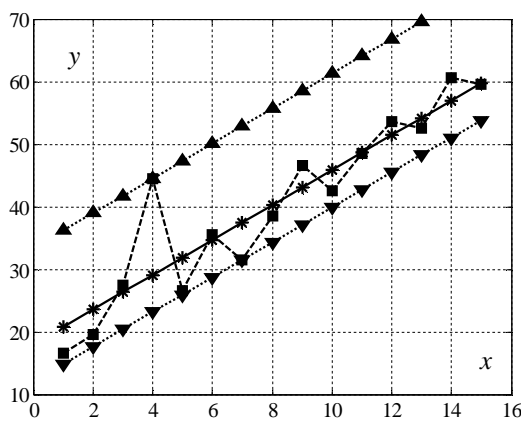
б



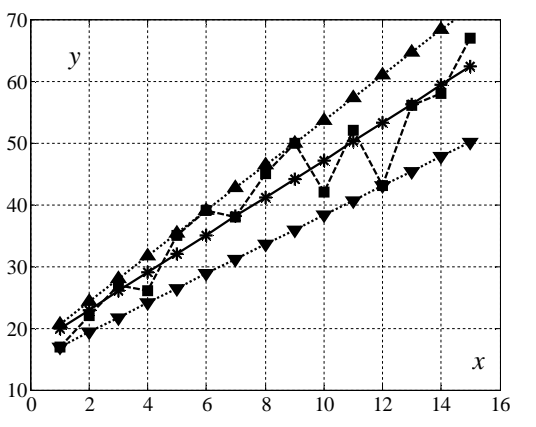
в



з



д



е

Рис. 5. «Коридоры» регрессий

На рис. 5 показаны примеры НЛР с асимметричными параметрами ТФП, полученных на основе разных исходных наборов данных. При этом НЛР, приведенные на рис. 5,а-д, имеют одинаковые значения меры уникальности σ и одинаковые уравнения КЛР, но разные «коридоры» НЛР. НЛР, приведенная на рис. 5,е, имеет значение меры уникальности σ , несколько отличающееся от значения меры уникальности σ данных, приведенных на рис. 5,а-д, и несколько иное уравнение КЛР.

Как видно из рисунков, зачастую «коридоры» НЛР характеризуются явно выраженной асимметрией ввиду использования асимметричных параметров ТФП. Такие «коридоры» могут иметь разную ширину h_r^p ($p = begin, end$; $r = low, up$) своих нижней ($r = low$) и верхней ($r = up$) частей в начале ($p = begin$) и в конце ($p = end$) относительно уравнения КЛР. Учет таких особенностей НЛР позволяет более точно дифференцировать уникальные фрагменты, представляющие собой кусочно-линейные объекты (наборы исходных данных).

Для оценки подобия уникальных фрагментов могут быть использованы нечеткие меры подобия, рекомендуемые к использованию при обработке изображений [5], в частности, следующие нечеткие меры, показавшие наивысшее качество результатов при выполнении оценки подобия тестовых наборов данных, описываемых с помощью уравнений НЛР:

$$S_1 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\min(u_A(x_i), u_B(x_i))}{\max(u_A(x_i), u_B(x_i))}; \quad (12)$$

$$S_2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |u_A(x_i) - u_B(x_i)|}{\sum_{i=1}^n (u_A(x_i) + u_B(x_i))}, \quad (13)$$

где $u_A(x_i)$ и $u_B(x_i)$ – значения функций принадлежности нечетких множеств A и B соответственно (значения функций принадлежности двух наборов исходных данных, соответствующим уравнениям НЛР); n – количество точек данных.

Как показывает анализ, в общем случае для обеспечения применимости нечетких мер подобия к тем или иным фрагментам (наборам исходных данных) необходимо выполнение предварительной классификации наборов исходных данных с учетом асимметрии «коридоров», что позволит исключить возможность получения неадекватных результатов упорядочения наборов исходных данных по степени близости (подобия) к некоторому эталонному фрагменту, например в случае, когда «коридоры» одних наборов данных существенно асимметричны (рис. 4,б), а «коридоры» других могут считаться близкими к симметричным (рис. 5,в), но имеют близкие значения отношений площадей своих верхних и нижних частей.

В связи с наличием асимметрии «коридоров» НЛР предлагается использовать следующую методику. Для каждого анализируемого фрагмента, сравниваемого с некоторым эталонным фрагментом, определяются точки, лежащие сверху (up) и снизу (low) относительно уравнения КЛР. Для каждой группы точек вычисляются значения мер подобия S_{up} и S_{low} . Оценка нечеткой меры подобия анализируемого фрагмента эталонному фрагменту находится как

$$S = \min(S_{up}, S_{low}), \quad (14)$$

где S_{up} и S_{low} вычисляются в соответствии с формулами для мер подобия S_1 (или S_2).

Целью дальнейших исследований должен быть выбор наиболее адекватных нечетких мер подобия и выявление ограничений, накладываемых на их применимость. При выполнении сравнительного анализа нескольких фрагментов (наборов данных) с эталонным фрагментом на предмет их подобия можно рекомендовать использование нескольких нечетких мер подобия одновременно с последующим выбором того варианта упорядочения по степени подобия, который дают большинство применяемых нечетких мер подобия.

Наряду с анализом нечетких мер подобия существенный интерес представляет анализ площадей и центроидов верхней и нижней частей «коридоров» НЛР анализируемых наборов данных. При этом площади могут быть легко найдены с использованием параметров $T_0 = (a_0, c_0, d_0)_{ТНЧ}$ и $T_1 = (a_1, c_1, d_1)_{ТНН}$ уравнения НЛР и формулы для нахождения площади треугольника, а центроиды – с применением формулы для вычисления центра тяжести одноточечных множеств [6]:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot u_B(x_i)}{\sum_{i=1}^n u_B(x_i)}. \quad (15)$$

Экспериментальная часть

Ниже рассмотрен пример, демонстрирующий построение регрессий, полученных при решении ЗКП вида (7)–(10) с асимметричными и симметричными параметрами ТФП, и подтверждающий целесообразность использования НЛР с асимметричными параметрами ТФП для дифференциации уникальных фрагментов ЭК. Исходные данные (значения (x, y)), на основе которых строятся регрессии, приведены в табл. 1.

На рис. 4,а приведен пример построения КЛР по данным табл. 1. При этом оптимальные значения параметров уравнения КЛР равны $k = 2,868$; $b = 17,325$; мера уникальности (СКО) $\sigma = 5,047$.

На рис. 4,б показан пример построения НЛР с асимметричными параметрами ТПФ по данным табл. 1.

При построении НЛР с асимметричными параметрами ТФП использовались следующие значения весовых коэффициентов k_1, k_2 и чисел α, ξ : $k_1 = 1$; $k_2 = 1$; $\alpha = 0$; $\xi = 0,00001$. Следует отметить, что выбор значений весовых коэффициентов k_1, k_2 не оказывает существенного влияния на результаты решения задачи ввиду использования асимметричных параметров ТФП [4].

Результаты расчетов показывают, что ядра треугольных нечетких чисел $T_0 = (a_0, c_0, d_0)_{ТНЧ}$ и $T_1 = (a_1, c_1, d_1)_{ТНН}$ уравнения НЛР с асимметричными параметрами ТФП совпадают с коэффициентами уравнения КЛР: $a_0 = k = 2,868$ и $a_1 = b = 17,325$ и, как следствие, совпадают вычисленные значения мер уникальности: $\sigma = 5,047$.

На рис. 4,в приведен пример построения НЛР с симметричными параметрами ТФП по данным табл. 1, демонстрирующий худшее качество этой регрессии по сравнению с КЛР и НЛР с асимметричными параметрами ТФП, так как ее мера уникаль-

ности ($\sigma = 5,125$), определяемая через СКО, оказалась больше, чем у двух других ($\sigma = 5,047$).

НЛР, полученные при решении ЗЛП вида (3)–(6), характеризуются еще более низким качеством, поскольку значения их мер уникальности (СКО) существенно превосходят значения мер уникальности (СКО) КЛР и НЛР, полученных при решении ЗКП вида (7)–(10), на одних и тех же наборах исходных данных [7].

Таблица 1

Исходные данные и значения функций принадлежности исходных данных уравнениям НЛР

x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
y	21	20	28	27	32	38	34	42	49	45	54	36	53
$u_{AS}(x,y)$	0	0	0	0,68	0,90	0,13	0,64	0,67	0,00	0,9	0,3	0,0	0,91
$u_S(x,y)$	0	0	0,28	0,77	0,83	0,43	0,70	0,74	0,39	1,0	0,5	0,0	0,97

Таблица 2

Параметры «коридоров» НЛР

Ширина «коридора»		Параметры ТФП	
		Асимметричные (AS)	Симметричные (S)
В начале	Нижняя	1,792	1,300
	Верхняя	0,808	1,300
В конце	Нижняя	19,542	18,314
	Верхняя	9,658	18,314
В начале	Суммарная	2,600	2,600
В конце	Суммарная	29,200	36,628

Таблица 3

Значения нечетких мер подобия фрагментов эталонному фрагменту

Фрагмент	Рис. 5					
	a	b	v	z	d	e
Нечеткая мера подобия по формуле (12)	0,009	0,117	0,099	0,00	0,115	0,277
Нечеткая мера подобия по формуле (13)	0,018	0,209	0,181	0,00	0,206	0,433
Номер в списке упорядочения по близости к эталонному фрагменту	5	2	4	6	3	1

В табл. 1 и табл. 2 приведены соответственно значения функции принадлежности вида (11), вычисленные на основе данных табл. 1, и значения ширины «коридоров» для уравнений НЛР с асимметричными (AS) и симметричными (S) параметрами ТФП.

Анализ табличных данных свидетельствует о том, что НЛР с асимметричными параметрами ТФП более точно описывает данные табл. 1, чем НЛР с симметричными параметрами ТФП (так как $\bar{u}_{AS} > \bar{u}_S$; $\bar{u}_{AS} = 0,42$ и $\bar{u}_S = 0,36$, где \bar{u}_{AS} и \bar{u}_S – средние значения функций принадлежности $u_{AS}(x,y)$ и $u_S(x,y)$ соответственно), именно благодаря использованию асимметричных параметров ТФП, позволивших ввести в рассмотрение нижний и верхний (относительно уравнения регрессии) «коридоры», имеющие разную ширину.

В трехмерном пространстве НЛР с асимметричными параметрами ТФП можно представить как поверхность, высота которой равна единице вдоль прямой, опреде-

ляемой уравнением регрессии (совпадающим с уравнением КЛР), и равна нулю вдоль прямых, определяемых нижней и верхней границами НЛР (рис. 4,б). Высота поверхности в промежуточных точках определяется в соответствии с уравнением для значений функции принадлежности вида (11).

На рис. 5,а–д показаны примеры «коридоров» НЛР для пяти фрагментов изображений, имеющих одинаковые значения мер уникальности (СКО) σ и одинаковые значения длин ломаных l , которыми аппроксимируются контуры фрагмента, но существенно отличающихся друг от друга своей «изломанностью». При этом данные для построения графиков на рис. 5,г получены из графиков рис. 4,а зеркальным их отображением относительно линии регрессии, а графики рис. 5,д получены аналогично из рис. 5,г, но с учетом отклонения данных, относительно прямой, определяемой уравнением регрессии. На рис. 5,е приведен пример «коридоров» НЛР для фрагмента с характеристиками (мера уникальности ($\sigma = 4,095$) и длина ломаной ($l = 89,872$)), несколько отличающимися от соответствующих характеристик других наборов данных, по которым построены графики (рис. 4,б, рис. 5,а–д).

Использование нечетких мер подобия, вычисляемых по формулам (12) и (13), для оценки подобия фрагментов, приведенных на рис. 5, а–е, эталонному фрагменту, приведенному на рис. 4,б, позволило получить одинаковые списки упорядочения рисунков и соответствующих им фрагментов и наборов данных по убыванию их меры подобия: рис. 5, е,б,д,в,а,г.

Как можно заметить, фрагмент, изображенный на рис. 5,е, визуально наиболее близок к эталонному фрагменту, изображенному на рис. 4,б. Фрагменты на рис. 5,а–д визуально существенно отличаются от эталонного фрагмента на рис. 4, б, и их упорядочение на предмет подобия эталонному фрагменту производилось для демонстрации результатов применения нечетких мер подобия по формулам (12) и (13).

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности использования нормальной линейной регрессии с асимметричными параметрами треугольной функцией принадлежности для решения задачи формирования уникальных фрагментов электронной карты, что позволяет более надежно дифференцировать фрагменты ЭК за счет учета большего количества характеристик анализируемых фрагментов изображений, наряду с уже используемой мерой уникальности σ , вычисляемой как СКО.

Методика оценки подобия уникальных фрагментов ЭК некоторому эталонному фрагменту с использованием нечетких мер подобия обеспечивает возможность упорядочения фрагментов ЭК, имеющих сходные значения меры уникальности σ , по близости к эталонному фрагменту.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Еремеев В.В., Козлов Е.П.* Автоматическая координатная привязка изображений от геостационарных космических систем наблюдений Земли по электронным картам // Вестник РГРТУ. – Рязань. – 2008. – № 23. – С. 14-20.
2. *Еремеев В.В., Козлов Е.П.* Технология уточнения геодезической привязки изображений, полученных с геостационарных спутников, с использованием электронных карт // Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий: сб. научн. статей. – М.: Физматлит, 2008. – С. 244-247.
3. LRIT/HRIT Global Specification. CGMS 03. Issue 2.6. Coordination Group for Meteorological Satellites. – 1999.
4. *Lee H., Tanaka H.* Fuzzy Approximations With Non-Symmetric Fuzzy Parameters In Fuzzy

- Regression Analysis // Journal of the Operations Research Society of Japan. – Vol. 42. – № 1. – 1999. – P. 98-112.
5. Van der Weken D., Nachtegaal M., Kerre E.E. An overview of similarity measures for images // Proceedings of ICASSP 2002 (IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing). – Orlando, USA. – 2002. – pp. 3317-3320.
 6. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.: ил.
 7. Мятлов Г.Н. Формирование уникальных фрагментов электронной карты с использованием нечеткой линейной регрессии // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. А.Н. Пылькина. – Рязань: РГРТУ, 2012. – С. 169-181.

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2013 г.

UNIQUENESS ESTIMATION TECHNIQUE OF THE ELECTRONIC MAP'S FRAGMENTS BASED ON THE FUZZY LOGIC

L.A. Demidova¹, G.N. Myatov²

¹ Riazan State Radiotechnical University
59/1, Gagarina st., Riazan, 390005

² Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

Uniqueness estimation technique of the electronic geographical chart's fragments is considered. The technique uses uniqueness of the mean square deviation of mapping contours of objects on a chart as a description of the chart's fragment uniqueness. The mean square deviation is calculated on the basis of the classical linear regression. Feasibility of using additional characteristics for the estimation of uniqueness of electronic chart's fragments is shown. It is offered an approach to the uniqueness estimation of the electronic chart's fragments based on an application of a fuzzy linear regression with an asymmetrical triangular accessory function, which provides an execution of more exact differentiation of electronic chart's fragments by means of introduction of additional characteristics of uniqueness. The mapping technique of unique electronic chart's fragments is offered. The mapping technique uses fuzzy measures of similarity of objects contours on the chart.

Keywords: *unique fragment, electronic chart, fuzzy linear regression, fuzzy similarity measure.*

*Lidiya A. Demidova (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Gennady N. Myatov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕТОДОМ ОБОБЩЕННОГО РАНЖИРОВАНИЯ. I. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

М.Ю. Лившиц, М.В. Цапенко, А.Н. Давыдов, Д.А. Барболин

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

E-mail: usat@samgtu.ru

Рассматриваются вопросы анализа динамики эффективности научных исследований методом обобщенного ранжирования на основе методологии многокритериального оценивания эффективности Data Envelopment Analysis. Проведено многокритериальное оценивание динамики эффективности научных исследований на примере прогнозов их развития по приоритетным направлениям модернизации российской экономики.

Материалы представлены в двух частях: в первой части рассмотрены вопросы прогнозирования показателей эффективности научных исследований, во второй дано обобщенное ранжирование показателей эффективности.

Исследование выполнено по государственному контракту № 16.740.11.0749 от 21 октября 2011 г. в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 гг.».

Ключевые слова: приоритетные направления модернизации экономики, многокритериальное оценивание, эффективность научных исследований, прогнозирование.

Введение

В первой части статьи рассмотрены вопросы прогнозирования развития научных исследований по пяти приоритетным направлениям модернизации российской экономики [1]: энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива; ядерные технологии; космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры; медицинские технологии, прежде всего диагностическое оборудование, а также лекарственные средства; стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения.

Способ прогнозирования показателей научных исследований

Прогнозирование частных показателей эффективности научной деятельности возможно на основе способов комплексного прогнозирования, в основу которых положены адаптивные методы Хольта и Брауна [2].

В качестве локальных показателей динамики эффективности научной деятельности по приоритетным направлениям развития экономики выберем три частных

Михаил Юрьевич Лившиц (д.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Управление и системный анализ в теплоэнергетике».

Михаил Владимирович Цапенко (к.э.н., доц.), доцент кафедры «Управление и системный анализ в теплоэнергетике».

Андрей Николаевич Давыдов (к.т.н.), начальник Управления научных исследований.

Дмитрий Алексеевич Барболин, ведущий инженер-программист отдела разработки и сопровождения информационных систем.

индикатора [3, 4]:

- количество проводимых научно-исследовательских работ (x_1);
- число исполнителей научной работы (x_2);
- суммарный объем финансирования выполненных исследований (x_3).

Методы Хольта и Брауна используются для прогнозирования временных рядов, когда есть тенденция к росту или падению значений временного ряда, а также когда есть данные за неполный цикл и выделить фактор сезонности невозможно [5].

На первом этапе прогнозирования осуществляется экспоненциальное сглаживание с помощью постоянных сглаживания α и β по трем уравнениям.

Первое уравнение описывает сглаженный ряд для прогнозного значения Y на момент времени t с использованием информации за предыдущий момент времени $t-1$:

$$Y_{\text{пр.},t} = \alpha \cdot (Y_{\text{пр.},t-1} + T_{t-1}) + (1-\alpha) \cdot Y_t, \quad (1)$$

где $Y_{\text{пр.},t}$, $Y_{\text{пр.},t-1}$ – прогнозные значения показателя в последующий и предыдущий моменты времени;

Y_t – табличное значение показателя в момент времени t ;

T_{t-1} – значение тренда на момент времени $t-1$, которое определяется из второго уравнения:

$$T_t = (1-\beta) \cdot (Y_{\text{пр.},t} - Y_{\text{пр.},t-1}) + \beta \cdot T_{t-1}. \quad (2)$$

Для определения прогноза на n периодов времени используется третье уравнение:

$$Y_{\text{пр.},t+n} = Y_{\text{пр.},t-1} + n \cdot T_t. \quad (3)$$

Частным случаем метода Хольта является метод Брауна, когда $\alpha=\beta$.

Постоянные сглаживания α и β подбираются путем перебора с определенным шагом. При более высоких значениях α в большей степени учитываются прошлые значения ряда, аналогично более высокие значения β оценивают прошлое движение процесса по сравнению с существующим.

На втором этапе определяются качественные показатели полученных прогнозов: на основе значений t -статистики выявляется значимость факторов в уравнении регрессии, прогностические свойства оцениваются на основе критерия Дарбина – Уотсона (DW) для заданных уровней значимости.

Исходные данные для анализа

Исходные данные по частным показателям динамики эффективности научной деятельности в рассматриваемом примере сформированы на основе статистики, собранной по результатам деятельности научных коллективов СамГТУ в период с 2000 по 2013 гг.

В табл. 1–3 представлены исходные данные по трем локальным показателям результативности научных исследований в разрезе пяти приоритетных направлений развития российской экономики.

На основе собранного статистического материала проведено прогнозирование показателей эффективности научной деятельности.

**Исходные данные по частному показателю
«Количество проводимых научно-исследовательских работ» (x_1)**

Год	Количество проводимых НИР, ед.				
	Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива	Ядерные технологии	Космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры	Медицинские технологии, прежде всего диагностическое оборудование, а также лекарственные средства	Стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения
2000	30	0	4	6	2
2001	46	3	11	8	8
2002	55	0	8	5	9
2003	84	4	12	14	16
2004	80	2	12	20	21
2005	81	1	12	20	24
2006	148	5	18	28	23
2007	112	3	7	26	16
2008	95	7	59	28	20
2009	178	2	18	24	14
2010	287	4	23	27	25
2011	171	3	23	53	29
2012	185	2	22	37	35
2013	62	3	10	15	13

Таблица 2

Исходные данные по частному показателю «Число исполнителей научной работы» (x_2)

Год	Число исполнителей НИР, чел.				
	Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива	Ядерные технологии	Космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры	Медицинские технологии, прежде всего диагностическое оборудование, а также лекарственные средства	Стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения
2000	38	0	13	10	8
2001	69	3	13	13	9
2002	76	0	10	12	10
2003	85	9	10	14	16
2004	93	7	11	14	21
2005	100	4	9	14	21
2006	106	9	8	23	31
2007	106	9	13	22	29
2008	112	11	12	26	28
2009	179	8	5	35	26
2010	183	10	16	38	54
2011	177	11	20	44	54
2012	233	16	21	54	65
2013	148	16	12	36	38

**Исходные данные и результаты прогнозирования по частному показателю
«Суммарный объем финансирования выполненных исследований» (x_3)**

Год	Суммарный объем финансирования выполненных исследований, руб.				
	Энергоэф- фективность и энергосбе- режение, в том числе вопросы раз- работки но- вых видов топлива	Ядерные технологии	Космические технологии, связанные с телекомму- никациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструк- туры	Медицинские технологии, прежде всего диагностиче- ское оборудо- вание, а также лекар- ственные средства	Стратегические информацион- ные технологии, включая вопро- сы создания су- перкомпьютеров и разработки программного обеспечения
2000	3468090,00	0,00	316637,00	419608,00	16637,00
2001	7457031,00	155000,00	228726,00	1063901,00	149526,00
2002	22808164,00	0,00	537981,00	1171197,00	954659,00
2003	26082153,00	464928,00	500757,00	4638461,00	952007,00
2004	34948293,00	152072,00	699000,00	4334033,00	2242947,00
2005	22967398,00	101902,00	939970,00	6925913,00	2142038,00
2006	26316220,00	2425129,00	714838,00	10687406,00	2100442,00
2007	28091737,00	810000,00	1944936,00	16637653,00	2699903,00
2008	28682153,00	3403492,00	2748794,00	13318687,00	2201538,00
2009	50686152,00	115000,00	1642299,00	34092478,00	3522500,00
2010	89211710,00	1438600,00	3023082,00	27507920,00	4104182,00
2011	38952029,00	1087500,00	3388661,00	72059149,00	5780611,00
2012	82886321,00	375000,00	4169764,00	29387048,00	9187788,00
2013	56074998,00	625000,00	542450,00	8397700,00	2479909,00

Прогнозирование показателей эффективности научной деятельности

Прогнозные значения показателей, полученные на основе методов Хольта и Брауна, представлены на графиках (рис. 1–15).

Прогнозные значения показателя «Количество проводимых научно-исследовательских работ» отражены на рис. 1–5, параметра «Число исполнителей научной работы» – на рис. 6–10, показателя «Суммарный объем финансирования выполненных исследований» – на рис. 11–15.

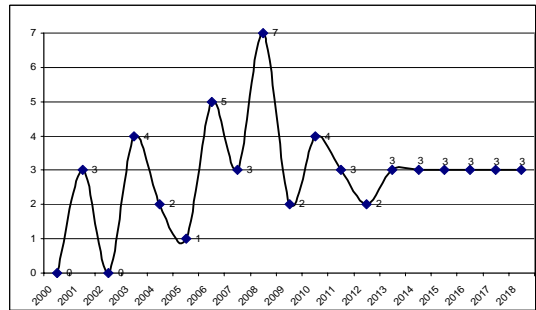
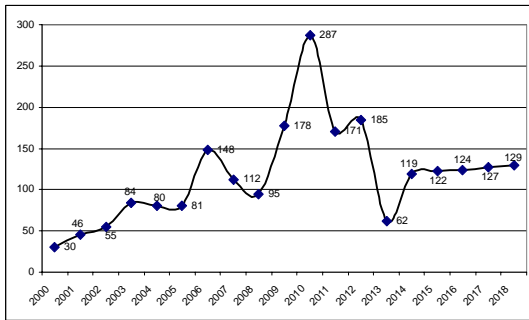


Рис. 1. Прогноз параметра «Количество проводимых НИР» по приоритету «Энергоэффективность и энергосбережение», в том числе вопросы разработки новых видов топлива, ед.

Рис. 2. Прогноз параметра «Количество проводимых НИР» по приоритету «Ядерные технологии», ед.

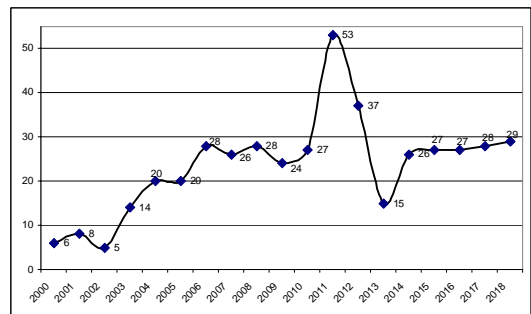
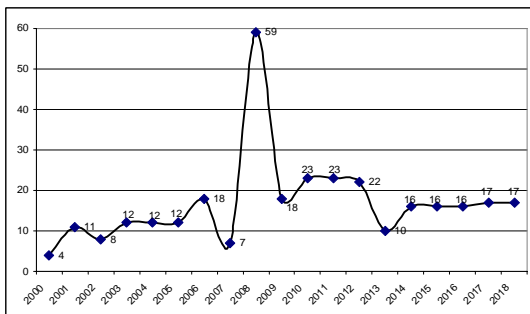


Рис. 3. Прогноз параметра «Количество проводимых НИР» по приоритету «Космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры», ед.

Рис. 4. Прогноз параметра «Количество проводимых НИР» по приоритету «Медицинские технологии, прежде всего диагностическое оборудование, а также лекарственные средства», ед.

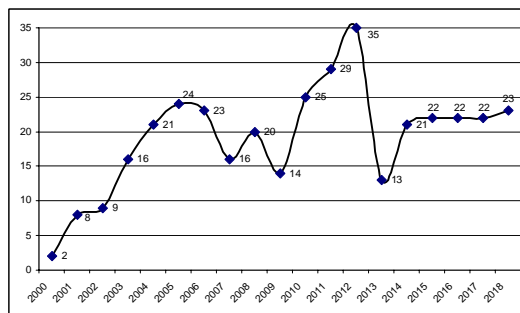


Рис. 5. Прогноз параметра «Количество проводимых НИР» по приоритету «Стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения», ед.

Как видно из графиков (см. рис. 1–5), для параметра, характеризующего количество проводимых НИР, прослеживается общая тенденция спада их числа к 2013 г., при этом прогнозные значения всех приоритетов, за исключением ядерных технологий, имеют тенденцию скачкообразного роста в 2014 г. в среднем на 170 %.

Для приоритета «Ядерные технологии» прогнозные значения числа реализуемых НИР стабильно и составляет три единицы, минимальное (единичное) увеличение количества исследований характерно для приоритета «Космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры».

На рис. 6–10 представлены результаты прогнозирования численности исполнителей НИР.

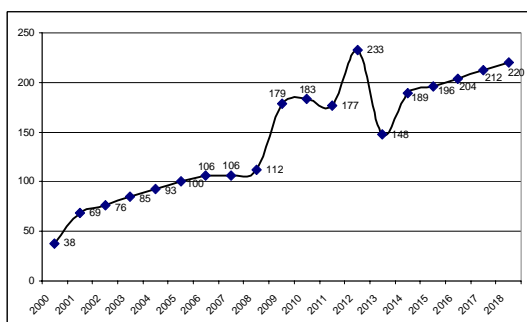


Рис. 6. Прогноз параметра «Число исполнителей научной работы» по приоритету «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива», чел.

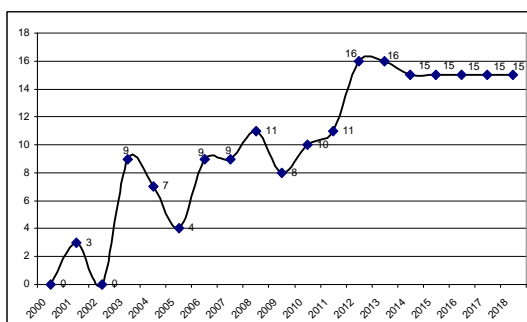


Рис. 7. Прогноз параметра «Число исполнителей научной работы» по приоритету «Ядерные технологии», чел.

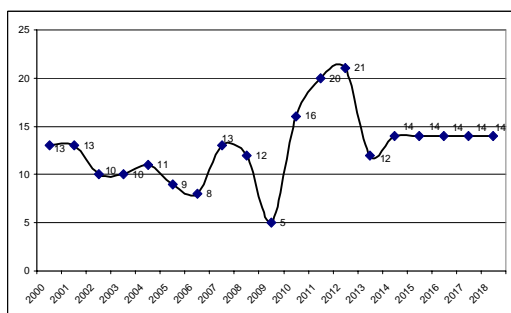


Рис. 8. Прогноз параметра «Число исполнителей научной работы» по приоритету «Космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры», чел.

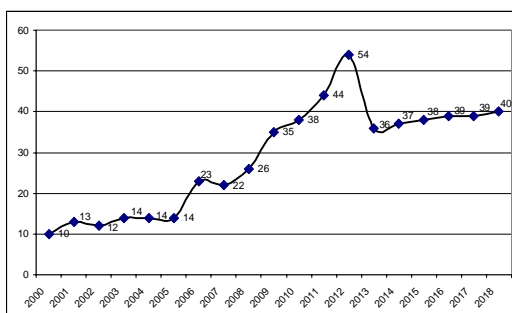


Рис. 9. Прогноз параметра «Число исполнителей научной работы» по приоритету «Медицинские технологии, прежде всего диагностическое оборудование, а также лекарственные средства», чел.

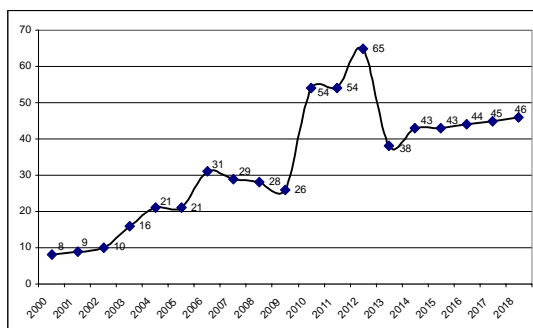


Рис. 10. Прогноз параметра «Число исполнителей научной работы» по приоритету «Стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения», чел.

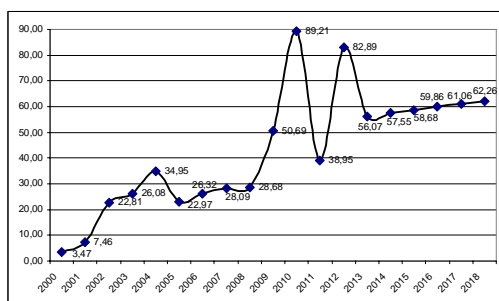


Рис. 11. Прогноз параметра «Суммарный объем финансирования выполненных исследований» по приоритету «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива», млн руб.

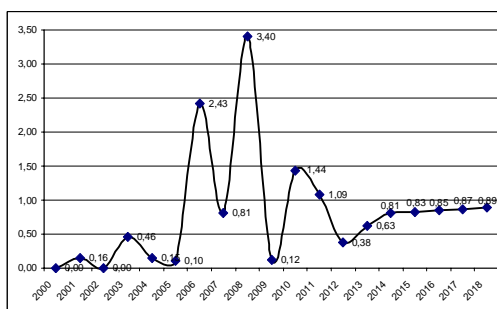


Рис. 12. Прогноз параметра «Суммарный объем финансирования выполненных исследований» по приоритету «Ядерные технологии», млн руб.

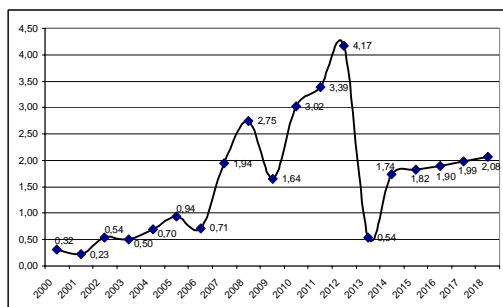


Рис. 13. Прогноз параметра «Суммарный объем финансирования выполненных исследований» по приоритету «Космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры», млн руб.

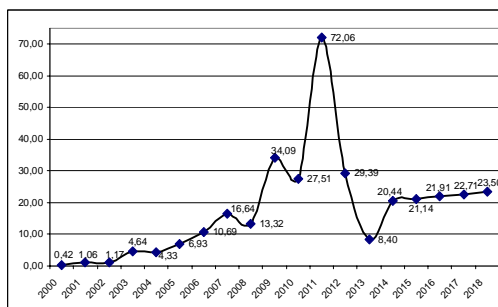


Рис. 14. Прогноз параметра «Суммарный объем финансирования выполненных исследований» по приоритету «Медицинские технологии, прежде всего диагностическое оборудование, а также лекарственные средства», млн руб.

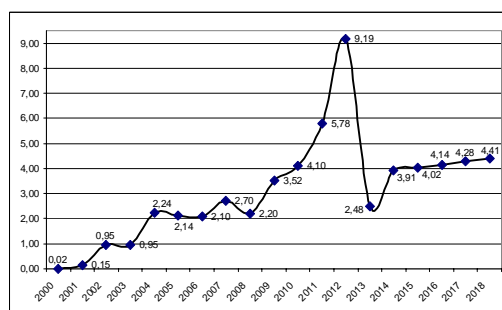


Рис. 15. Прогноз параметра «Суммарный объем финансирования выполненных исследований» по приоритету «Стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения», млн руб.

Как видно из графиков (см. 6–10), для трех приоритетов модернизации российской экономики, за исключением второго и третьего («Ядерные технологии» и «Космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры»), характерна тенденция роста численности исполнителей, занятых по анализируемым направлениям.

Для приоритетов «Ядерные технологии» и «Космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры» прогнозные значения численности исполнителей стабилизированы на уровне 2013 г. и составляют 15 и 14 человек соответственно.

Также для всех направлений за исключением приоритета «Ядерные технологии» в 2013 г. характерен спад численности исследователей в среднем на 60 %.

На рис. 11–15 представлены результаты прогнозирования объемов финансирования НИР.

Как видно из графиков (см. рис. 11–15), наблюдается падение объемов финансирования в 2013 г. и дальнейшее увеличение прогнозных объемов финансирования к 2018 г. со средним годовым темпом роста 3 %, при этом наибольший рост объемов финансирования прогнозируется для третьего приоритета «Космические технологии, связанные с телекоммуникациями, включая и ГЛОНАСС, и программу развития наземной инфраструктуры» – 4,5 %, наименьший темп роста – 2 % – характерен для первого приоритета «Энергоэффективность и энергосбережение, в том числе вопросы разработки новых видов топлива».

Заключение

Получены прогнозные значения локальных характеристик эффективности научных исследований для различных приоритетов модернизации российской экономики на основе ретроспективной информации.

Эти результаты являются основой для обобщенного ранжирования динамики эффективности научных исследований. Результаты ранжирования будут представлены во второй части статьи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Материалы первого заседания комиссии по модернизации российской экономики (18 июня 2009 г.). – М.: 2009.
2. Светульников С.Г. Методы социально-экономического прогнозирования: Учебник для вузов. Т. II / С.Г. Светульников, И.С. Светульников. – СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2010. – 103 с.
3. Диллигенский Н.В., Цапенко М.В., Давыдов А.Н. Методология и технологии формирования и клас-

- сификации знаний о деятельности научных коллективов // РАН, СНГ РАН, ИПУСС. Труды XIII Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах». Самара, 15 – 17 июня 2011. – С. 95–103.
4. Дилигенский Н.В., Цапенко М.В., Давыдов А.Н. Методы оценки стратегических приоритетов научных исследований // Стратегическое планирование и развитие предприятий. Секция 3 / Материалы XIII Всероссийского симпозиума. Москва, 10–11 апреля 2012 г. Под ред. чл.-корр. РАН Г.Б. Клейнера. – М.: ЦЭМИ РАН, 2012. – 182 с. (С. 49–51).
 5. Ханк Д.Э., Уичерн Д.У., Раймс А.Дж. Бизнес-прогнозирование. – М.: Вильямс, 2003.

Статья поступила в редакцию 14 октября 2013 г.

PERFORMANCE ANALYSIS OF DYNAMICS RESEARCH BY GENERALIZED RANKING (PART ONE – FORECAST)

M.Y. Livshits, M.V. Tsapenko, A.N. Davydov, D.A. Barbolin

Samara State Technical University
244, Molodogvardeiskaya st., Samara, 443100
E-mail: usat@samgtu.ru

The paper deals with the analysis of the dynamics of the efficiency of scientific research based on the generalized method of ranking - Data Envelopment Analysis. In this article the results of multicriteria estimation of the efficiency of the dynamics of scientific research on the example forecasts of scientific studies on priority directions of modernization of the Russian economy. The materials presented in two parts: the first part addressed issues of forecasting performance of scientific research, in the second - a generalized ranking performance.

Keywords: *priorities for the modernization of the economy, multicriteria estimation of the efficiency scientific research, forecasting.*

*Mihail Y. Livshits (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Mihail V. Tsapenko (Ph.D. (Econ.)), Associate Professor.
Andrey N. Davydov (Ph.D. (Techn.)), Head of Research.
Dmitry A. Barbolin, Senior Software Engineer.*

МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ

В.Н. Митрошин

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

Предлагается методология автоматизации производства проводных кабелей связи с использованием усовершенствованного управления технологическими процессами (АРС-систем) на основе прогнозирующих моделей для обеспечения требуемого качества кабеля как канала связи с учетом его полосы пропускания.

Ключевые слова: многопараметрическое управление, прогнозирующие модели, автоматизация, производство кабелей.

Коаксиальные и LAN-кабели являются основными каналами связи большинства современных технических систем. Процессы изготовления проводных кабелей связи (КС), в полной мере обладающие признаками сложных систем, являются непрерывными, многооперационными технологическими процессами.

При этом качество изготавливаемого кабеля как канала связи определяется неким глобальным критерием (обобщенным параметром) качества [1], характеризующим потребительские свойства продукции, в роли которого чаще всего выступает однородность волнового сопротивления кабеля по его длине [2], и может быть измерено лишь на готовом кабеле.

Формирование обобщенного параметра качества кабеля осуществляется на всех технологических операциях его производства. Изготовление кабелей связи подвержено влиянию случайных возмущающих воздействий, а потому контролируемые «на проход» параметры кабельного изделия (локальные параметры качества) имеют непостоянные по длине кабеля значения и являются случайными функциями координаты длины кабеля x – т. е. нерегулярными. Большинство технологических режимных параметров работы оборудования вследствие случайных возмущений нестационарны во времени.

Поэтому необходимыми условиями получения качественной продукции являются автоматизация всех промежуточных технологических операций ее производства для минимизации нерегулярностей локальных параметров качества кабеля и стабилизация режимных параметров работы оборудования на основе требований к предельным величинам нерегулярностей первичных параметров кабеля и стабильности технологических режимных параметров работы оборудования, сформулированных исходя из необходимости обеспечения требуемого качества изготавливаемого кабеля.

Важнейшей операцией изготовления КС, во многом определяющей качество кабеля как канала связи, является операция изолирования – наложения изоляции на токопроводящую жилу, осуществляемая на экструзионных линиях.

«Оптимизация» всех локальных систем автоматической стабилизации должна основываться на использовании математической модели, отражающей взаимосвязь обобщенного параметра, характеризующего качество нерегулярного кабеля, с

Владимир Николаевич Митрошин (д.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Автоматика и управление в технических системах».

управляемыми параметрами (локальными параметрами качества) кабеля и технологическими режимными параметрами, являющимися воздействиями объекта управления [3].

Технологический процесс производства КС в принципе нереализуем без использования систем автоматического регулирования основных технологических параметров оборудования и параметров качества изготавливаемого кабеля [4]. Но до настоящего времени подавляющее большинство автоматических систем в кабельном производстве строятся как локальные системы регулирования – системы стабилизации первичных параметров кабеля (диаметра и погонной емкости изолированной жилы), режимных параметров работы технологического оборудования (температур зон нагрева цилиндра экструдера, температуры воды в охлаждающих ваннах, оборотов шнека, скорости изолирования и т. д.).

Как правило, традиционные подходы к моделированию технологических процессов кабельного производства основаны на упрощенных описаниях, базирующихся на гипотезах о стационарности, линейности и гауссовом характере изучаемых процессов. Для большинства реальных задач данные предположения являются некорректными. Динамические системы кабельного производства многомерны, нестационарны и описываются сложными, порою скачкообразными нелинейными процессами. Кроме того, некоторые объекты (экструдеры, охлаждающие ванны) являются классическими объектами с распределенными параметрами. В результате указанного противоречия классические схемы моделирования не отвечают физике автоматизируемых процессов и потому приводят к малодостоверным оценкам, не удовлетворяющим потребностям систем управления.

Широко применяемая в кабельной промышленности практика измерения качественных параметров изготавливаемой продукции на «готовом» кабеле (в конце охлаждающих ванн) приводит к появлению в структуре систем автоматического регулирования (стабилизации) параметров звеньев с большим транспортным запаздыванием (порядка десятков секунд).

В связи с этим возникает проблема создания математического и программного инструментария, обеспечивающего возможность эффективного моделирования эволюции сложных динамических систем и его приложения к задачам прогнозирования состояния и качественных характеристик изготавливаемой продукции.

В основу целеполагания построения систем автоматического управления производством КС должно быть положено обеспечение требуемого эксплуатационного показателя изготавливаемого кабеля как канала связи с учетом полосы частот пропускаемого сигнала на основе применения системного подхода к автоматизируемому технологическому процессу [5]. Существующие в настоящее время подходы к автоматизации процессов производства КС и используемые технические решения имеют ряд недостатков.

Во-первых, повышение требований к проводным КС как каналам передачи информации накладывает новые жесткие ограничения на их эксплуатационные параметры качества и, соответственно, ужесточает требования к статическим и динамическим характеристикам систем управления технологическими процессами изготовления КС. В настоящее время верхняя частота полосы пропускания проводных КС достигает 1 ГГц.

Известно, что максимальная частота передаваемого по кабелю электрического сигнала (верхняя частота рабочего диапазона кабеля) f_b определяет максимальную частоту взаимодействующих с ним пространственных неоднородностей g_{\max} первичных параметров кабеля следующим образом [6]:

$$g_{\max} = \frac{2f_B}{V_e}, \quad (1)$$

где V_e – скорость распространения электромагнитной волны по кабелю. Для коаксиальной пары она равна [7]

$$V_e = c/\sqrt{\varepsilon_r} \quad (2)$$

где c – скорость света в вакууме;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Соответственно, минимальный пространственный период неоднородностей, которые должны быть устранены системой регулирования, равен

$$L_{k\min} = \frac{1}{g_{\max}}. \quad (3)$$

Для современных кабелей с верхней границей полосы пропускания 600 МГц .
 $L_{k\min} = 0,165$ м.

На существующих экструзионных линиях контроль первичных параметров качества изоляции осуществляется обычно на сформировавшейся изоляции, т. е. на выходе ванн охлаждения, длина которых составляет более 10 м. При этом в системах регулирования по ошибке контролируемого параметра величина транспортного запаздывания τ определяется по формуле

$$\tau = \frac{L_B}{V}, \quad (4)$$

где L_B – длина ванны охлаждения до места установки датчиков;

V – скорость изготовления кабеля (изолирования).

Так как в процессе производства производительность линии (скорость изолирования) может изменяться, то транспортное запаздывание является переменной величиной.

Но, как известно [8], время регулирования систем с транспортным запаздыванием при использовании ПИД-регуляторов можно получить порядка $(4 \div 6)\tau$, что соответствует пространственным неоднородностям $(4 \div 6)L_B$. Следовательно, неоднородности контролируемых параметров с пространственным периодом менее четырехкратного расстояния от головки прессы до контролирующих датчиков не могут быть скорректированы системой управления.

$$L_{k\min} \geq 4L_B = 4V\tau \quad (5)$$

Тогда с учетом (1) ÷ (5) может быть сформулировано требование к величине максимального транспортного запаздывания в системе управления процессом изолирования:

$$\tau \leq \frac{V_e}{8f_B V}. \quad (6)$$

Для рассматриваемого изготавливаемого кабеля и технологической линии ME-90 фирмы Maillefer со скоростью изолирования $V = 30$ м/мин величина предельного транспортного запаздывания в соответствии с (6) не должна превышать 0,08 с, что абсолютно нереально (на рассматриваемой линии величина транспортного запаздывания составляет порядка 30 с).

Отсюда очевидно, что использование стандартных систем регулирования (ста-

билизации) формируемых на операции изолирования первичных параметров качества кабеля – диаметра и погонной емкости изоляции – по их отклонению от номинальных значений не только неприемлемо, а даже вредно для КС, рассчитанных на передачу сигналов с высокой верхней частотой полосы пропускания [9].

Для управления процессом изолирования необходимо располагать датчики контролируемых параметров либо в самом экструдере, либо в непосредственной близости от него. Например, для контроля количества выдавливаемого прессом полимера с помощью измерения диаметра изолированной жилы лазерный датчик диаметра нужно располагать непосредственно на выходе кабельной головки. При этом на основе использования уравнения сохранения массы, если известен номинальный диаметр изолированной жилы $D_{из1}$ при температуре окружающей среды (например 20 °С), можно легко получить формулу для уставки датчика диаметра $D_{из0}$ в месте его установки на выходе кабельной головки:

$$D_{из0} = \sqrt{D_{из1}^2 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_0} + d^2 \cdot \frac{(\rho_0 - \rho_1)}{\rho_0}}, \quad (7)$$

где d – диаметр медного проводника;

ρ_0 – плотность полимера при температуре его выхода из кабельной головки;

ρ_1 – плотность полимера при температуре окружающей среды.

Зависимость плотности полиэтилена высокого давления низкой плотности (ПЭНП) марки 153-01, обычно применяемого для изолирования кабелей связи, от температуры приведена на рис. 1 [10].

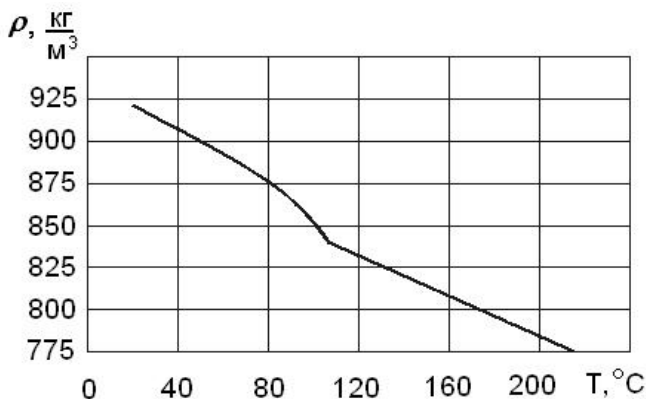


Рис. 1. Зависимость плотности полиэтилена марки 153-01 от температуры

Формула (7) получена без учета температурного расширения медного проводника. Она может быть использована для косвенных оценок (расчета) диаметра изолированной жилы при любой температуре полимера, измеряемой датчиком температуры.

Во-вторых, необходимо по возможности осуществлять динамическую компенсацию возмущающих воздействий. Так, в работах [11, 12] показано, что высокочастотные периодические неоднородности диаметра накладываемой кабельной изоляции обусловлены периодическими пульсациями давления расплава в кабельной головке, вызываемыми вращающимся шнеком экструдера.

Предложенная в [12] методика определения характеристик гармонических возмущающих воздействий в системе стабилизации давления расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера и описанная в [13] система динамической компенсации данного возмущающего воздействия позволили уменьшить амплитуду пульсаций давления на выходе системы стабилизации практически в пять раз. Это в свою очередь привело к существенному уменьшению гармонических изменений мгновенной объемной производительности экструдера и, соответственно, к значительному уменьшению периодических неоднородностей диаметра изоляции кабельной заготовки.

Динамическая компенсация возмущающих воздействий в виде управления по прямой связи может заблаговременно компенсировать сильные измеряемые помехи. При этом передаточная функция $z(p)$, учитывающая действие возмущающего воздействия на объект, может быть найдена экспериментально в режиме ручного управления процессом (см. рис. 1). Затем на основании нее можно вывести передаточную функцию $c(p)$ для управляющего элемента, компенсирующего возмущающее воздействие.

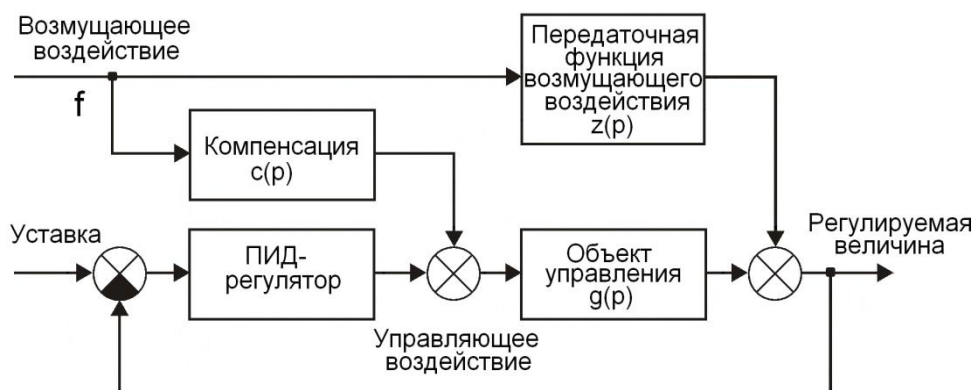


Рис. 2. Динамическая компенсация возмущающих воздействий

Концепции регулирования, основанные на использовании ПИД-регуляторов в локальных системах стабилизации параметров качества в сложных, многосвязных, нестационарных процессах, наталкиваются на ряд ограничений, в том числе и рассмотренных выше.

Значительно больше возможностей появляется у разработчиков с использованием получивших достаточно широкое распространение систем усовершенствованного управления процессами (Advanced Process Control, APC-систем), в которых математически описываются даже сложные взаимосвязи параметров процесса. APC-системы реализуют в реальном масштабе времени на базе многомерного управления технологическим процессом на основе прогнозирующей модели этого процесса стратегию оптимального управления технологической установкой при минимальном вмешательстве оператора.

Правда, в настоящее время подобные системы применяются в основном в нефтедобывающей, химической, нефтехимической промышленности, энергетике, фармацевтике [14].

Перед системой усовершенствованного управления технологическим процессом стоят, по сути, две задачи: за короткое время вычислить оптимальный режим для

технологического процесса и удерживать технологический процесс в рамках этого режима, оперативно предупреждая и устраняя отклонения от него.

Широкое внедрение на промышленных предприятиях систем усовершенствованного управления технологическим процессом стало возможным благодаря использованию современных средств промышленной автоматизации и доступности персональных компьютеров. Компьютеры позволили практически мгновенно производить огромные объемы вычислений, необходимых для построения модели технологического процесса, прогнозирования его хода и оперативного реагирования на малейшие отклонения от оптимального режима.

Кроме того, системы усовершенствованного управления технологическими процессами наряду с многочисленными основными функциями регулирования могут предоставить пользователю дополнительные возможности, такие как динамическая компенсация возмущающих воздействий, оптимизация настроек PID-регуляторов, контроль качества регулирования, реализация упределителей Смита, прогнозирующее многосвязное регулирование на основе модели и т. д. При этом использование систем усовершенствованного управления технологическими процессами позволяет:

- радикально уменьшить нежелательные колебания параметров процесса;
- заметно сократить расход сырья и потребление энергии;
- повысить производительность и качество продукции;
- уменьшить нагрузки на управляющий персонал.

Очевидно, что для управления технологическими процессами изготовления КС использование АРС-систем является самым перспективным направлением.

Примером применения задачи многосвязного управления с прогнозом, которая может быть эффективно решена средствами АРС, является управление давлением и температурой в зоне дозирования одночервячного экструдера для оптимизации массового выхода расплава полимера с целью стабилизации формируемого диаметра изоляции и, соответственно, минимизации нерегулярностей волнового сопротивления изготавливаемого кабеля.

Известно выражение для волнового сопротивления Z коаксиального кабеля [7]

$$Z = 60 \sqrt{\ln \frac{D}{D_{из}} \cdot \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\epsilon_{из}} \cdot \ln \frac{D_{из}}{d} \cdot \ln \frac{D}{d}} . \quad (8)$$

Здесь D – внутренний диаметр внешнего проводника;

$\epsilon_{из}$ – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Для LAN-кабелей 7-й категории (на базе экранированной витой пары) выражение для волнового сопротивления имеет вид [15]

$$Z = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_{эКВ}}} \cdot \ln \frac{D_{из1} + D_{из2} - d}{d} \cdot \frac{4d_э^2 - (D_{из1} + D_{из2})^2}{4d_э^2 + (D_{из1} + D_{из2})^2} , \quad (9)$$

где $D_{из1}$ и $D_{из2}$ – диаметры по изоляции проводов пары;

$d_э$ – диаметр экрана;

$\epsilon_{эКВ}$ – эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость скрученной пары.

Выражения (8) и (9) позволяют формулировать требования к параметрам кабельных заготовок на промежуточных технологических операциях производства кабелей связи, например на операции изолирования.

С учетом коэффициентов чувствительности K_j волнового сопротивления к тех-

нологическим параметрам качества Π_j имеем для полной производной зависимости $Z(x)$

$$\frac{dZ}{dx} = \sum_{j=1}^n K_j \cdot \frac{d\Pi_j}{dx} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial Z}{\partial \Pi_j} \cdot \frac{d\Pi_j}{dx}. \quad (10)$$

Отсюда получаем выражение для линейного приближения вариации волнового сопротивления при достаточно малых воздействиях по приращениям частных параметров качества относительно номинального режима, характеризуемого n -мерным вектором $\overline{\Pi}_n = (\Pi_{j_n}), j = \overline{1, n}$:

$$\Delta Z(x) = \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial Z}{\partial \Pi_j} \right|_0 \cdot \Delta \Pi_j(x) = \sum_{j=1}^n K_j \Delta \Pi_j(x). \quad (11)$$

Зависимость (11) характеризует взаимосвязь отклонения $\Delta Z(x)$ волнового сопротивления кабеля от своего номинального значения, рассматриваемого в качестве эксплуатационного показателя качества, с отклонениями технологических параметров качества кабеля от своих номинальных значений. Она позволяет сформулировать требования к предельным допускам отклонений локальных параметров качества, формируемых на промежуточных операциях изготовления кабеля.

Предлагаемая методика использования системного подхода при автоматизации многооперационных непрерывных технологических процессов производства проводных кабелей связи позволяет гарантировать обеспечение требуемого качества кабеля как канала связи с учетом его полосы пропускания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гроднев И.И., Шварцман В.О. Теория направляющих систем связи. – М.: Связь, 1978. – 296 с.
2. Ефимов Н.Е., Останькович Г.А. Радиочастотные линии передач. – М.: Связь, 1977. – 408 с.
3. Чостковский Б.К., Смородинов Д.А. Оптимальное управление возмущенным процессом в многоконтурной системе // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2009. – № 3(25). – С. 61-66.
4. Пешков И.Б. Мировая кабельная промышленность: переход в новый век // Кабели и провода. – 2001. – № 4. – С. 3-6.
5. Митрошин В.Н., Митрошин Ю.В. Использование системного подхода при автоматизации непрерывных технологических процессов кабельного производства // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 7(28). – С. 26-31.
6. Дорезюк Н.И. Гармонический анализ периодических неоднородностей волнового сопротивления коаксиальных кабелей // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. – 1974. – № 6. – С. 18-22.
7. Гроднев И.И., Фролов П.А. Коаксиальные кабели связи. – М.: Радио и связь, 1983. – 208 с.
8. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974.
9. Митрошин В.Н., Митрошин Ю.В. Автоматизация процесса наложения изоляции при непрерывном производстве проводных кабелей связи // Информационные, измерительные и управляющие системы (ИИУС-2010). Материалы Международной научно-технической конференции (Самара, 17-21 мая 2010 г.). – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – С. 36-40.
10. Полиэтилен. Справочное руководство / Под ред. М.И. Гарбара. – Л.: Госхимиздат, 1955.
11. Marinov S., Steller R. Erfassung der Sohmelzeströmung in Extrusionsdüsen bei pulsierendem Druckdradien. – Plaste und Kautschuk, 1985, Bd. 32, № 9, s. 346-349.
12. Митрошин В.Н. Регулирование давления расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера при пульсирующем градиенте давления // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 1(29). – С. 39-44.
13. Митрошин В.Н. Синтез системы стабилизации давления расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 3(31). – С. 237-239.
14. Mikko Rönkä, George Buckbee. Контроль систем регулирования увеличивает отдачу от модернизации

- ции // Автоматизация и IT в нефтегазовой отрасли. – 2011. – № 1(3). – С. 50-53.
15. *Митрошин В.Н.* Математическое описание формирования параметров качества LAN-кабелей при их изготовлении // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2005. – Вып. 37. – С. 54-58.

Статья поступила в редакцию 29 октября 2013 г.

MULTIPARAMETER CONTROL OF COMMUNICATION CABLES PRODUCTION BASED ON PREDICTIVE MODELS

V.N. Mitroshin

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

A methodology for automating the production of wired communication cables using advanced process control (APC-systems) based on predictive models to ensure the required quality of the cable as a communication channel based on its bandwidth is proposed.

Keywords: *multivariable control, predictive models, automation, cable manufacture.*

Vladimir N. Mitroshin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

СИСТЕМА ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ КОЛЛЕКТИВНЫМИ ИНВЕСТИЦИЯМИ В МОДЕЛИ МАРКОВИЦА

В.Г. Саркисов

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

Предлагается новый подход к построению системы доверительного управления инвестициями. Рассматриваются оптимальные инвестиционные портфели пула инвесторов с различными предпочтениями в рамках модели Марковица.

Ключевые слова: доверительное управление, инвестиционный портфель, модель Марковица, доходность, минимизация риска.

Введение

Рассматривается вопрос получения дополнительной полезности при управлении портфелями группы инвесторов. В настоящее время существует два основных подхода:

1) индивидуальное управление – для каждого инвестора вырабатывается или выбирается индивидуальная стратегия управления портфелем, соответствующая его системе предпочтений;

2) коллективное управление – инвесторы со схожими предпочтениями объединяются в группы (фонды, пулы), для каждой из которых выбирается стратегия.

Индивидуальное управление более качественно учитывает предпочтения, однако сама услуга управления требует больших трудозатрат и обходится инвестору дороже.

В настоящей работе предлагается новый подход к формированию фондов, который потенциально позволит превзойти по эффективности индивидуальное управление при сохранении преимуществ коллективного управления.

Оптимальный портфель ценных бумаг в модели Марковица

Классический подход Марковица [1] к построению портфеля из множества $I = \{1, 2, \dots, n\}$ инвестиционных инструментов предполагает известными оценки математических ожиданий m и ковариаций C доходностей этих инструментов:

$$m = \begin{pmatrix} m_1 \\ \vdots \\ m_n \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} C_{11} & \dots & C_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ C_{n1} & \dots & C_{nn} \end{pmatrix}.$$

На основе этих оценок для заданной структуры портфеля $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ можно определить оценки математического ожидания E и дисперсии V доходности:

$$E = m^T x = \sum_{i=1}^n m_i x_i; \quad (1)$$

$$V = x^T Cx = \sum_{i,j=1}^n C_{ij} x_i x_j . \quad (2)$$

Для каждого значения доходности E решалась задача минимизации риска:

$$V = x^T Cx \rightarrow \min_x ; \quad (3)$$

$$E = m^T x ; \quad (4)$$

$$x_i \geq 0, \quad i = 1..n ; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1 . \quad (6)$$

Ограничения (5) и (6) определяют множество допустимых портфелей.

При решении задачи (3), (4), (6) по методу множителей Лагранжа без учета ограничения (5) установлено [2], что доли x_i инструментов в портфеле при увеличении E изменяются линейно:

$$x_i = a_i E + b_i , \quad (7)$$

где

$$\begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} = \frac{k_0}{k_0^2 - k_1 k_2} C^{-1} J - \frac{k_1}{k_0^2 - k_1 k_2} C^{-1} m, \quad \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} = \frac{k_0}{k_0^2 - k_1 k_2} C^{-1} m - \frac{k_2}{k_0^2 - k_1 k_2} C^{-1} J ;$$

$$k_0 = J^T C^{-1} m, \quad k_1 = J^T C^{-1} J, \quad k_2 = m^T C^{-1} m, \quad J = (1, \dots, 1)^T .$$

В целях учета ограничения (5) для каждого значения E разобьем все множество I инвестиционных инструментов на два подмножества:

$$I_0(E) = \{i : x_i = 0\} ; \quad (8)$$

$$I_1(E) = \{i : x_i > 0\} . \quad (9)$$

Очевидно, что решение задачи (3), (4), (6) для подмножества $I_1(E)$ эквивалентно решению задачи (3), (4), (5), (6) для множества I . Если для всех значений некоторого интервала $E \in (E_1, E_2)$ множества $I_1(E)$ совпадают, то на этом интервале (по аналогии с (7)) имеет место линейная зависимость долей инструментов в портфеле от математического ожидания доходности.

Таким образом, введение ограничения (5) приводит к тому, что доли инструментов в портфеле с ростом E изменяются линейно до тех пор, пока из портфеля не будет исключен (то есть переведен из $I_1(E)$ в $I_0(E)$) или, наоборот, добавлен (переведен из $I_0(E)$ в $I_1(E)$) инвестиционный инструмент. Дальнейшее изменение долей портфеля также происходит линейно, но с другими коэффициентами a_i и b_i .

На рис. 1 представлены результаты решения задачи (3)–(6) для 10 наиболее ликвидных акций российского фондового рынка.

Подставив (7) в (2), получим зависимость V от E :

$$\begin{aligned}
 V &= \sum_{i,j=1}^n C_{ij} x_i x_j = \sum_{i,j=1}^n C_{ij} (a_i E + b_i)(a_j E + b_j) = \\
 &= E^2 \sum_{i,j=1}^n C_{ij} a_i a_j + E \sum_{i,j=1}^n C_{ij} (a_i b_j + a_j b_i) + \sum_{i,j=1}^n C_{ij} b_i b_j.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Обозначив $\alpha_2 = \sum_{i,j=1}^n C_{ij} a_i a_j$, $\alpha_1 = \sum_{i,j=1}^n C_{ij} (a_i b_j + a_j b_i)$, $\alpha_0 = \sum_{i,j=1}^n C_{ij} b_i b_j$, получим:

$$V = \alpha_2 E^2 + \alpha_1 E + \alpha_0
 \tag{11}$$

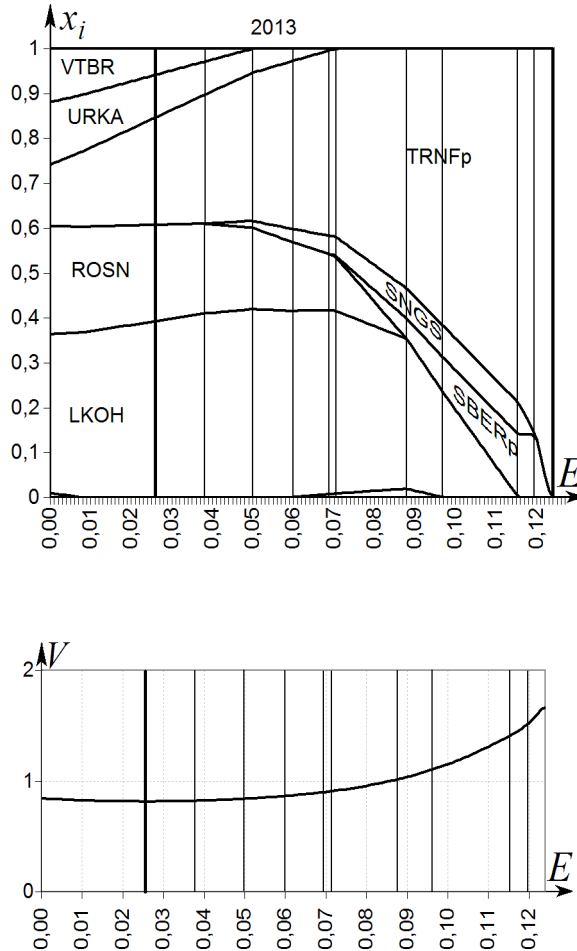


Рис. 1. Зависимость долей активов и риска от доходности эффективного портфеля

Вывод: на каждом участке, где доли инструментов в портфеле изменяются линейно, зависимость дисперсии доходности от математического ожидания доходности параболическая, а вся зависимость – кусочно-параболическая (жирная линия на рис. 2). Зависимость $V(E)$ является гладкой и строго вогнутой.

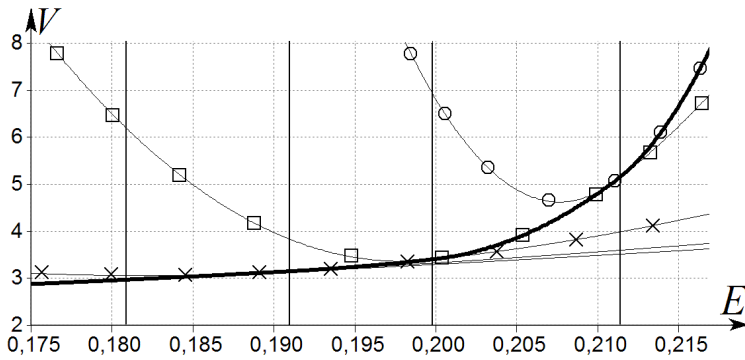


Рис. 2. Эффективная граница множества портфелей

Объединение портфелей пары инвесторов с различными предпочтениями в модели Марковица

В зависимости от индивидуальных предпочтений по риску и доходности оптимальным для инвестора является тот или иной портфель на эффективной границе множества портфелей. Портфель, полученный путем объединения портфелей инвесторов с существенно различающимися предпочтениями, часто является неоптимальным, что говорит о возможности увеличения математического ожидания E или снижения дисперсии V доходности при объединении портфелей. Таким образом, формирование объединенного портфеля группы инвесторов потенциально создает для каждого из инвесторов лучшее соотношение риска и доходности, чем они имели бы без объединения портфелей.

Рассмотрим условия возникновения такого преимущества.

Теорема 1. Если портфели x^* и x^{**} принадлежат разным участкам (т. е. $\exists i: (a_i^* \neq a_i^{**}) \vee (b_i^* \neq b_i^{**})$), то любой портфель $x_{sum} = \lambda x^* + (1-\lambda)x^{**}$ при $\lambda \in (0, 1)$ неоптимален.

Доказательство. Покажем, что при $\lambda \in (0, 1)$ все объединенные портфели x_{sum} являются допустимыми, то есть удовлетворяют ограничениям (5) и (6). Портфели x^* и x^{**} удовлетворяют условию (5), следовательно

$$\begin{cases} x_i^* \geq 0 \\ x_i^{**} \geq 0 \\ \lambda \in (0, 1) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lambda x_i^* \geq 0 \\ (1-\lambda)x_i^{**} \geq 0 \end{cases} \Rightarrow x_{sum i} \geq 0, \quad (12)$$

то есть портфель x_{sum} также удовлетворяет ограничению (5). Для проверки (6) найдем сумму долей инструментов в портфеле x_{sum} :

$$\sum_{i=1}^n x_{sum i} = \sum_{i=1}^n (\lambda x_i^* + (1-\lambda)x_i^{**}) = \lambda \sum_{i=1}^n x_i^* + (1-\lambda) \sum_{i=1}^n x_i^{**} = \lambda \cdot 1 + (1-\lambda) \cdot 1 = 1, \quad (13)$$

то есть ограничение (6) для портфеля x_{sum} также выполняется. Таким образом, при любом значении $\lambda \in (0, 1)$ портфель x_{sum} является допустимым.

Покажем, что x_{sum} не принадлежит эффективной границе при $\lambda \in (0, 1)$. С изменением λ доли инструментов в портфеле x_{sum} изменяются линейно. Как было показа-

но выше, при линейном изменении долей в портфеле зависимость V от E – параболическая вида (11). На рис. 3 представлен фрагмент эффективной границы.

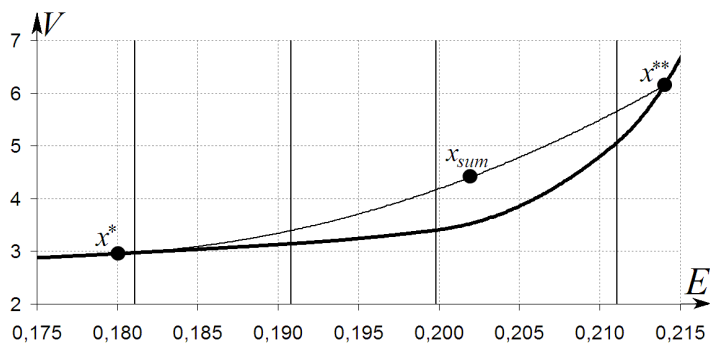


Рис. 3. Объединенный портфель, не принадлежащий эффективной границе

Так как эффективная граница является гладкой кривой, участки эффективной границы $V = \alpha_2^* E^2 + \alpha_1^* E + \alpha_0^*$ и $V = \alpha_2^{**} E^2 + \alpha_1^{**} E + \alpha_0^{**}$ в точке пересечения E_0 имеют одинаковые значения и одинаковые первые производные:

$$V(E_0) = \alpha_2^* E_0^2 + \alpha_1^* E_0 + \alpha_0^* = \alpha_2^{**} E_0^2 + \alpha_1^{**} E_0 + \alpha_0^{**}; \quad (14)$$

$$\frac{dV(E_0)}{dE} = 2\alpha_2^* E_0 + \alpha_1^* = 2\alpha_2^{**} E_0 + \alpha_1^{**}. \quad (15)$$

Параболы эффективной границы не могут отличаться лишь коэффициентом α_0 , так как при этом не выполнялось бы условие непрерывности границы (14), следовательно, параболы отличаются хотя бы одним из коэффициентов α_1 или α_2 . Из условия гладкости границы (15) следует, что отличие в коэффициентах α_1 влечет различие в α_2 (и наоборот). При этом $\alpha_2^* < \alpha_2^{**}$ (при $E^* < E^{**}$). Содержащая x_{sum} парабола не может совпадать одновременно с двумя разными параболом, образующими эффективную границу. Следовательно, x_{sum} не принадлежит эффективной границе.

Таким образом, портфели x_{sum} неоптимальны при $\lambda \in (0, 1)$, т. к. соответствующая парабола проходит выше эффективной границы.

Вывод: объединение портфелей инвесторов с различным уровнем неприятия риска и последующая оптимизация объединенного портфеля создают возможность для повышения доходности и/или снижения риска без ухудшения других показателей.

Анализ эффективности разбиения множества инвесторов на подмножества в модели Марковица

Обобщим результаты, полученные для пары инвесторов на случай произвольного множества инвесторов.

При анализе возможностей инвестирования для множества инвесторов возникает вопрос оптимального разбиения этого множества на подмножества с целью повышения эффективности.

Пусть множество $M = \{1, 2, \dots, m\}$ состоит из m инвесторов, для каждого из которых с учетом индивидуальных предпочтений на эффективной границе выбран оптимальный портфель x^{j*} ($j=1..m$). Объединенный портфель множества инвесторов M :

$$x_{sum} = \sum_{j \in M} \lambda_j x^{j*}, \quad (16)$$

где коэффициенты λ_j характеризуют долю j -го инвестора в объединенном портфеле множества:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1, \quad (17)$$

$$\lambda_j \geq 0. \quad (18)$$

Как было показано ранее, при существенном различии в уровне неприятия риска инвесторами подмножества портфель x_{sum} не принадлежит эффективной границе и может быть заменен эффективным портфелем x_{sum}^* , который характеризуется математическим ожиданием доходности не меньшим, а дисперсией доходности не большей, чем у портфеля x_{sum} .

Разобьем множество M на непересекающиеся подмножества M_k :

$$\bigcup_{k=1}^m M_k = M; \quad (19)$$

$$M_k \cap M_l = \emptyset, k \neq l. \quad (20)$$

Подмножество M_k характеризуется объединенным портфелем x_{sum}^k :

$$x_{sum}^k = \sum_{j \in M_k} \lambda_j x^{j*}. \quad (21)$$

Теорема 2. Портфель, являющийся объединением всех портфелей x_{sum}^k подмножеств M_k , не может иметь одновременно большее математическое ожидание доходности и меньшую дисперсию доходности, чем портфель x_{sum}^* .

Доказательство. Пусть все множество инвесторов разбито на два подмножества и для каждого подмножества найден объединенный портфель (x_{sum}^1 и x_{sum}^2) и соответствующий оптимальный портфель (x_{sum}^{1*} и x_{sum}^{2*}). Если x_{sum}^{1*} и x_{sum}^{2*} принадлежат одному отрезку линейного изменения долей в портфеле (рис. 4), то портфель x_{sum} , полученный при их объединении (то есть при объединении всех инвесторов), принадлежит эффективной границе.

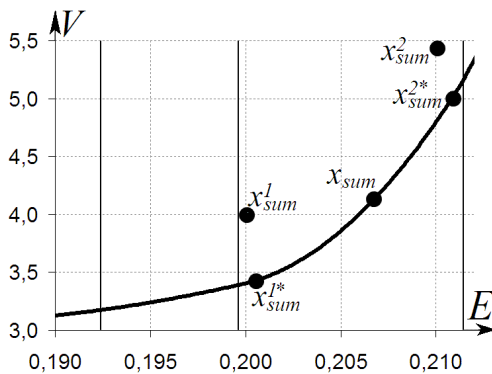


Рис. 4. Объединенный портфель подмножеств инвесторов, принадлежащий эффективной границе

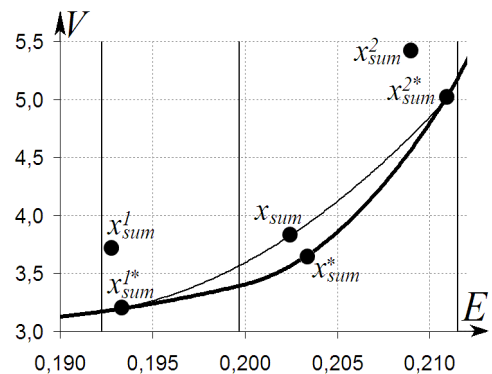


Рис. 5. Объединенный портфель подмножеств инвесторов, не принадлежащий эффективной границе

Если же x_{sum}^{I*} и x_{sum}^{2*} принадлежат разным отрезкам (рис. 5), то портфель x_{sum} (в соответствии с *теоремой 1*) не является эффективным, то есть существует портфель x_{sum}^* с большим математическим ожиданием и меньшей дисперсией доходности, принадлежащий эффективной границе.

При разбиении множества инвесторов на большее количество подмножеств можно провести аналогичные рассуждения, присоединяя к одному из подмножеств последовательно все остальные: $M = (((M_1 \cup M_2) \cup M_3) \dots \cup M_m)$.

Вывод: любое разбиение множества на группы дает эффективность оптимизации портфеля не выше, чем оптимизация объединенного портфеля всего множества инвесторов.

О распределении дополнительной полезности между инвесторами и управляющим

В общем случае распределение дополнительной полезности (снижение риска или повышение доходности) является вопросом договоренности/соглашения инвесторов.

При разработке договоренности предлагается пользоваться следующим соображением: чем дальше оптимальный портфель данного инвестора лежит на эффективной границе от объединенного оптимизированного портфеля, тем больше его вклад в повышение эффективности управления. Следовательно, основная часть дополнительной полезности должна быть распределена в пользу таких инвесторов. Если же индивидуальный портфель инвестора по структуре совпадает с объединенным, то такой инвестор не участвует в создании дополнительной полезности. Единственным стимулом для его привлечения к формированию объединенного портфеля является снижение трудозатрат управляющего.

Обобщение понятия инвестиционного инструмента

Теорема 2 может быть применена для широкого спектра инвестиций. При управлении инвестиционным портфелем в качестве инструментов могут выступать не только традиционно рассматриваемые ценные бумаги, но и некоторые другие объекты или процессы, имеющие ликвидационную стоимость и генерирующие поток платежей в пользу инвестора. Примеры таких инструментов:

- оборудование для модернизации производства;
- недвижимость, покупаемая для дальнейшей сдачи в аренду;
- алгоритм управления портфелем реальных ценных бумаг. В этом случае портфель инвестора будет составлен из долей портфелей, каждый из которых управляется по своему алгоритму [3].

При использовании различных инвестиционных инструментов ограничения на доли в портфеле приобретают вид, отличный от (5) и (6) [4] При этом задача (3)–(6) является задачей нелинейного программирования (в большинстве случаев с линейными ограничениями) [5, 6].

Выводы

1. Предложен принципиально новый подход к построению системы управления инвестиционным фондом – объединение инвесторов с несопадающими предпочтениями. Трудозатраты управляющего фондом сопоставимы с таковыми у управляющего обычным фондом, а эффективность выше, чем при индивидуальном управлении.

2. Доказана целесообразность централизованного управления инвестиционными

портфелями группы инвесторов. Для группы в целом формируется единая стратегия управления инвестиционным портфелем. Показана возможность извлечения дополнительной прибыли или снижения риска при объединении портфелей.

3. При управлении свободными средствами подразделений холдинга [7**Ошибка!** **Источник ссылки не найден.**] централизация управления позволяет повысить эффективность. Если подразделения управляют своими инвестициями самостоятельно (или объединяясь в некоторые группы), то доходность получается ниже, а риск – выше, чем при объединении всех в одну группу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. *Markowitz H.* Portfolio selection // *The Journal Of Finance.* – 1952. – № 1. – С. 77-91.
2. *Шарп У.Ф., Александер Г.Дж., Бейли Д.В.* Инвестиции. – М.: Инфра-М, 2003.
3. *Саркисов В.Г., Саркисов Г.А.* Синтез системы управления инвестиционным портфелем на основе моделирования виртуальных финансовых инструментов // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки.* – 2011. – № 3(31). – С. 33-39.
4. *Саркисов В.Г.* Критериальные множества оценок качества управления инвестиционным портфелем при различных критериях риска // *Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки.* – 2012. – № 4(36). – С. 82-90.
5. *Kuhn H.W., Tucker A.W.* Nonlinear programming // *Proceedings of 2nd Berkeley Symposium.* Berkeley: University of California Press. pp. 481-492, 1951.
6. *Karush W.* Minima of Functions of Several Variables with Inequalities as Side Constraints. M.Sc. Dissertation. Dept. of Mathematics, Univ. of Chicago, Chicago, Illinois.
7. *Саркисов В.Г., Ваганова Н.Р.* Интеграция подсистемы управления инвестиционным портфелем на финансовом рынке в систему управления промышленным холдингом // *Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2013): Материалы VII Международной конференции.* – ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. – 2013. – С. 301-303.

Статья поступила в редакцию 3 октября 2013 г.

THE OPTIMAL CONTROL SYSTEM OF COLLECTIVE INVESTMENTS UNDER MARKOWITZ'S MODEL

V.G. Sarkisov

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

A new approach to collective trust management is offered. Optimum investment portfolios of a pool of investors with various preferences under Markovits's model are treated.

Keywords: *trust management, investment portfolio, Markowitz's model, profitability, risk minimization.*

Vigen G. Sarkisov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВЫМИ ОБЪЕКТАМИ

А.В. Стариков, С.Л. Лисин

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

E-mail: star58@mail.ru

Рассмотрен синтез системы управления неустойчивым объектом третьего порядка. Предложен способ структурного построения системы управления неустойчивым объектом. Найдены передаточные функции регуляторов, обеспечивающие высокое быстродействие.

Ключевые слова: *система управления, структурная схема, передаточная функция, неустойчивый объект управления, пропорционально-дифференциальный регулятор, интегральный регулятор, условия устойчивости.*

Ряд технических задач требует обеспечить качественное управление принципиально неустойчивыми объектами. К таким объектам прежде всего относятся процессы, имеющие внутренние положительные обратные связи. Примером может послужить процесс перемещения ротора в поле электромагнитов, который описывается передаточной функцией [1]

$$W_{oy}(p) = \frac{k_{oy}}{a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p - 1}, \quad (1)$$

где k_{oy} – коэффициент передачи объекта управления;

a_0 , a_1 и a_2 – коэффициенты характеристического полинома.

Поскольку как минимум один коэффициент характеристического полинома передаточной функции (1) является отрицательным, то рассматриваемый объект управления действительно неустойчив.

Для обеспечения высокого быстродействия при управлении объектом с передаточной функцией вида (1) предлагается применить двухконтурную систему (рис. 1).

Первый (внутренний) контур содержит пропорционально-дифференциальный регулятор с передаточной функцией:

$$W_{nd}(p) = k_{nd}(T_{nd}p + 1),$$

где k_{nd} – коэффициент передачи, а T_{nd} – постоянная времени регулятора, собственно объект управления, датчик обратной связи с коэффициентом передачи k_{oc} и дифференцирующее звено $k_{diff}p$. Пропорционально-дифференциальный регулятор предназначен для создания необходимого фазового сдвига во внутреннем контуре.

Передаточная функция первого замкнутого контура:

Александр Владимирович Стариков (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Сергей Леонидович Лисин, начальник отдела кадров.

$$W_1(p) = \frac{k_{nd}k_{oy}(T_{nd}p+1)}{a_0p^3 + (a_1 + k_{p1}T_{nd})p^2 + (a_2 + k_{p1})p - 1},$$

где $k_{p1} = k_{nd}k_{oy}k_{диф}k_{oc}$.

Второй контур замкнут по датчику обратной связи и кроме замкнутого внутреннего контура содержит пропорциональный регулятор с коэффициентом передачи k_n , который обеспечивает вместе с регулятором внутреннего контура требуемые статические и динамические свойства системы управления.

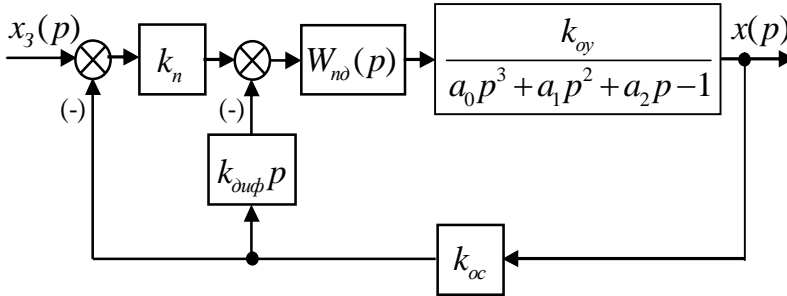


Рис. 1. Структурная схема двухконтурной системы управления неустойчивым объектом третьего порядка

Передаточная функция замкнутой двухконтурной системы управления:

$$W_2(p) = \frac{x(p)}{x_3(p)} = \frac{k_{p2}(T_{nd}p+1)}{k_{oc}(k_{p2}-1) \left[\frac{a_0}{k_{p2}-1} p^3 + \frac{a_1 + k_{p1}T_{nd}}{k_{p2}-1} p^2 + \frac{a_2 + k_{p1} + k_{p2}T_{nd}}{k_{p2}-1} p + 1 \right]}, \quad (2)$$

где $k_{p2} = k_n k_{nd} k_{oy} k_{oc}$.

Условие устойчивости системы третьего порядка по критерию Гурвица [2]:

$$\left. \begin{aligned} k_{p2} - 1 > 0; \\ (a_1 + k_{p1}T_{nd})(a_2 + k_{p1} + k_{p2}T_{nd}) - a_0(k_{p2} - 1) > 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Система (3) позволяет найти граничные с точки зрения устойчивости значения коэффициентов передачи пропорционально-дифференциального k_{nd} и пропорционального k_n регуляторов. Подставляя значения k_{p1} , k_{p2} и переходя в (3) к равенствам, получим следующую систему уравнений относительно переменных k_{nd} и k_n :

$$\left. \begin{aligned} k_n k_{nd} &= \frac{1}{k_{oy} k_{oc}}; \\ (k_{oy} k_{диф} k_{oc})^2 T_{nd}^2 k_{nd}^2 + (k_{oy} k_{oc})^2 k_{диф}^2 T_{nd}^2 k_n^2 k_{nd}^2 + k_{oy} k_{диф} k_{oc} (a_1 + a_2 T_{nd}) k_{nd} + \\ &+ k_{oy} k_{oc} (a_1 T_{nd} - a_0) k_n k_{nd} + a_0 + a_1 a_2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Подставляя первое уравнение (4) во второе, получим выражение для граничного значения коэффициента $k_{n\delta.\min}$ передачи пропорционально-дифференциального регулятора:

$$(k_{oy}k_{ouф}k_{oc})^2 T_{n\delta} k_{n\delta.\min}^2 + k_{oy}k_{ouф}k_{oc} [a_1 + (a_2 + T_{n\delta})T_{n\delta}] k_{n\delta.\min} + a_1(a_2 + T_{n\delta}) = 0.$$

Отсюда минимальное значение коэффициента передачи пропорционально-дифференциального регулятора:

$$k_{n\delta.\min} = \frac{-[a_1 + (a_2 + T_{n\delta})T_{n\delta}] + \sqrt{[a_1 + (a_2 + T_{n\delta})T_{n\delta}]^2 - 4a_1(a_2 + T_{n\delta})T_{n\delta}}}{2k_{oy}k_{ouф}k_{oc}T_{n\delta}}.$$

Из первого уравнения (4) вытекает минимальное значение $k_{n.\min}$ коэффициента передачи пропорционального регулятора:

$$k_{n.\min} = \frac{1}{k_{n\delta}k_{oy}k_{oc}}.$$

Теоретически ограничений на максимальную величину $k_{n\delta}$ и k_n в рамках рассматриваемой непрерывной модели системы управления не существует.

Для обоснованного выбора параметров настройки пропорционального и пропорционально-дифференциального регуляторов, а именно k_n , $k_{n\delta}$ и $T_{n\delta}$, разделим знаменатель передаточной функции (2) на числитель. В результате можно записать приближенное равенство:

$$W_2(p) \approx \frac{k_{p2}}{k_{oc}(k_{p2}-1) \left[\frac{a_0}{(k_{p2}-1)T_{n\delta}} p^2 + \frac{a_1 + k_{p1}T_{n\delta} - \frac{a_0}{T_{n\delta}}}{(k_{p2}-1)T_{n\delta}} p + 1 \right]}. \quad (5)$$

Значение постоянной времени $T_{n\delta}$ пропорционально-дифференциального регулятора будем выбирать исходя из обеспечения хорошего приближения в (5). При выполнении условия

$$k_{p2} \gg 1 \quad (6)$$

выбор величины $T_{n\delta}$ следует из решения кубического уравнения

$$T_{n\delta}^3 - \frac{a_2}{\Delta_{omн}(k_{p2}-1)-1} T_{n\delta}^2 + \frac{a_1}{\Delta_{omн}(k_{p2}-1)-1} T_{n\delta} - \frac{a_0}{\Delta_{omн}(k_{p2}-1)-1} = 0, \quad (7)$$

где $\Delta_{omн}$ – относительная погрешность полюса передаточной функции (2), компенсирующего соответствующий нуль.

Оптимальным будет являться действительное значение постоянной времени $T_{n\delta}$, получаемое при минимально возможной величине $\Delta_{omн}$. При этом в формуле (5) можно принять строгое равенство.

Теперь необходимо произвести обоснованный выбор величин $k_{n\delta}$ и k_n соответ-

ствующих регуляторов и параметра дифференцирующего звена $k_{\text{диф}}$. Решение будем искать в таком виде, чтобы всегда $k_{\text{нд}} = k_n$, а характер переходного процесса по своим параметрам был близок к показателям качества технического оптимума [3]. Это позволит при простой технической реализации системы управления ($k_{\text{нд}}$ и k_n можно выбирать кратными двум) получить практически оптимальный по быстродействию переходный процесс.

Из передаточной функции (5) следует, что коэффициент демпфирования колебаний в рассматриваемой системе управления равен

$$\xi = \frac{a_1 + k_{p1}T_{\text{нд}} - \frac{a_0}{T_{\text{нд}}}}{2\sqrt{a_0(k_{p2} - 1)T_{\text{нд}}}}. \quad (8)$$

Параметры регуляторов входят в коэффициенты передачи k_{p1} ; k_{p2} . Приравнявая $k_{\text{нд}} = k_n$ в выражении (8), после несложных преобразований получим

$$k_{\text{нд}} = k_n = \frac{a_1 T_{\text{нд}} - a_0}{T_{\text{нд}} \left(2\xi \sqrt{k_{\text{оу}} k_{\text{ос}} a_0 T_{\text{нд}}} - k_{\text{оу}} k_{\text{диф}} k_{\text{ос}} T_{\text{нд}} \right)}.$$

И в то же время можно записать:

$$k_{\text{диф}} = 2\xi \sqrt{\frac{a_0}{k_{\text{оу}} k_{\text{ос}} T_{\text{нд}}}} - \frac{a_1}{k_{\text{нд}} k_{\text{оу}} k_{\text{ос}} T_{\text{нд}}} + \frac{a_0}{k_{\text{нд}} k_{\text{оу}} k_{\text{ос}} T_{\text{нд}}^2}. \quad (9)$$

Выбирая $\xi = 0,7 \div 0,8$, по формуле (9) определяем необходимое значение $k_{\text{диф}}$, при котором $k_{\text{нд}} = k_n$ теоретически при любых их численных значениях. Очевидно, что чем больше величина коэффициентов передачи $k_{\text{нд}}$ и k_n , тем выше быстродействие системы управления.

Двухконтурная система управления будет обладать статической ошибкой. Для исключения этого недостатка необходимо ввести дополнительный контур, в результате чего получается трехконтурная система управления (рис. 2).

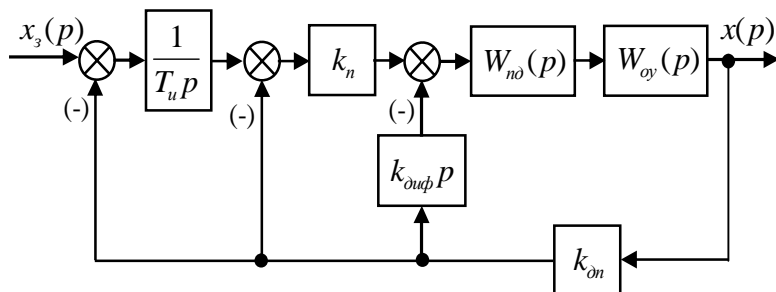


Рис. 2. Структурная схема трехконтурной системы управления неустойчивым объектом третьего порядка

Она содержит интегральный регулятор во внешней контуре, который компенсирует все помехи, охваченные обратной связью.

Передаточная функция замкнутой трехконтурной системы управления неустойчивым объектом (1)

$$W_3(p) = \frac{(T_{no}p+1)}{k_{oc} \left[\frac{a_0 T_u}{k_{p2}} p^4 + \frac{(a_1 + k_{p1} T_{no}) T_u}{k_{p2}} p^3 + \frac{(a_2 + k_{p1} + k_{p2} T_{no}) T_u}{k_{p2}} p^2 + \left(\frac{k_{p2} - 1}{k_{p2}} T_u + T_{no} \right) p + 1 \right]},$$

где T_u – постоянная времени интегрального регулятора, представляет собой динамическое звено четвертого порядка, условие устойчивости которого определяется системой неравенств

$$\left. \begin{aligned} &k_{p2} - 1 > 0; \\ &(k_{p2} - 1) \left[(a_1 + k_{p1} T_{no}) (a_2 + k_{p1} + k_{p2} T_{no}) - a_0 (k_{p2} - 1) \right] T_u^2 + \\ &\left\{ \begin{aligned} &k_{p2} T_{no} (a_1 + k_{p1} T_{no}) (a_2 + k_{p1} + k_{p2} T_{no}) - \\ &- 2a_0 k_{p2} (k_{p2} - 1) T_{no} - k_{p2} (a_1 + k_{p1} T_{no})^2 \end{aligned} \right\} T_u - a_0 k_{p2}^2 T_{no}^2 > 0. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Переходя во втором условии устойчивости (10) к равенству, получим квадратное уравнение для определения граничного значения постоянной времени $T_{u,sp}$ интегрального регулятора

$$aT_{u,sp}^2 + bT_{u,sp} + c = 0, \quad (11)$$

где $a = (k_{p2} - 1) \left[(a_1 + k_{p1} T_{no}) (a_2 + k_{p1} + k_{p2} T_{no}) - a_0 (k_{p2} - 1) \right]$; $c = -a_0 k_{p2}^2 T_{no}^2$;

$$b = k_{p2} T_{no} (a_1 + k_{p1} T_{no}) (a_2 + k_{p1} + k_{p2} T_{no}) - 2a_0 k_{p2} (k_{p2} - 1) T_{no} - k_{p2} (a_1 + k_{p1} T_{no})^2.$$

Из (11) следует, что при выбранных параметрах пропорционального и пропорционально-дифференциального регуляторов (т. е. при известных значениях k_{p1} и k_{p2}) минимальная величина постоянной времени интегрального регулятора, при которой система находится на границе устойчивости, определяется выражением

$$T_{u,sp} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (12)$$

Для обеспечения показателей качества переходных процессов, близких к техническому оптимуму, необходимо выбирать постоянную времени T_u интегрального регулятора из соотношения

$$T_u = (4 \div 5) T_{u,sp}. \quad (13)$$

Статическая точность трехконтурной системы управления неустойчивым объектом определяется только погрешностью датчика обратной связи.

Вариация параметров настройки пропорционального и пропорционально-дифференциального регуляторов приводит к изменению $T_{u,sp}$. Чем больше значение коэффициентов передачи k_{no} и k_n , тем меньше может быть величина T_u . Анализ вы-

ражений (11), (12) и (13) показывает, что в рассматриваемой непрерывной модели трехконтурной системы управления теоретически нет ограничений на минимальное значение постоянной времени T_u и достижимое быстродействие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макаричев Ю.А., Стариков А.В. Теоретические основы расчета и проектирования радиальных электромагнитных подшипников. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 150 с.
2. Бесекинский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
3. Терехов В.М., Осипов О.И. Системы управления электроприводов: Учебник для студ. высш. учеб. заведений / Под ред. В.М. Терехова. – М.: Академик, 2005. – 304 с.

Статья поступила в редакцию 14 октября 2013 г.

STRUCTURAL AND PARAMETRIC SYNTHESIS OF UNSTABLE- OBJECT CONTROL SYSTEMS

A. V. Starikov, S. L. Lysin

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

The synthesis of a control system for a third-order unstable object is discussed. A method for structural construction of an unstable-object control system is offered. Regulator transfer functions to ensure high speed are found.

Keywords: control system, function block diagram, transfer function, unstable control object, proportional-plus-derivative action control, integral controller, stability conditions.

*Alexander V. Starikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Sergey L. Lysin, Head of HR.*

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОСВЯЗНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СИМПЛЕКСНЫМ МЕТОДОМ

Б.К. Чостковский¹, В.Ю. Денисов², А.И. Дьяконов¹

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

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

Рассматривается использование различных видов перекрестного регулирования в многосвязной системе управления обобщенным параметром, симплексного метода оптимизации параметров регулятора.

Ключевые слова: многосвязные системы, перекрестное регулирование, межконтурные регуляторы, обобщенный параметр, регулярный симплекс.

Данная статья является продолжением исследования многосвязной управляемой системы, в которой определено простейшее структурное решение построения системы двухсвязного регулирования [1].

В работе решается задача синтеза структуры и оптимизации параметров системы управления многосвязным объектом управления, управляемая координата которой, в дальнейшем называемая обобщенным параметром P , формируется как взвешенная алгебраическая сумма управляемых координат двух односвязных объектов управления, в частности – как их разность. Причем каждый односвязный объект охвачен обратной связью, реализующей контур автоматической стабилизации управляемой координаты данного объекта y_i на основе пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) закона управления.

Особенностью описанной двухконтурной системы (рис. 1) является существенное различие времени регулирования контуров, которое обусловлено различной инерционностью односвязных объектов, определяемой их физической природой. Пусть, например, большей инерционностью обладает объект с передаточной функцией (ПФ) W_{0y2} .

Примером такой двухконтурной системы является система автоматической стабилизации параметров пористой изоляции, накладываемой методом экструзии на внутренний проводник изготавливаемого коаксиального кабеля [2].

В качестве выходной координаты медленнодействующего контура y_2 может рассматриваться степень пористости экструдированной изоляции, регулируемая путем изменения потока азота, вводимого в расплав полиэтилена в цилиндре экструдера. В качестве выходной координаты быстродействующего контура y_1 может рассматриваться диаметр изоляции на выходе головки экструдера, регулируемый путем изменения скорости вращения шнека экструдера.

Вариации пористости и диаметра изоляции определяют вариации первичных па-

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

Владимир Юрьевич Денисов, инженер-программист.

Артем Игоревич Дьяконов, магистрант.

раметров передачи изготавливаемого кабеля, которые, суммируясь, образуют величину волнового сопротивления кабеля, рассматриваемого как обобщенный параметр P [2].

Можно отметить, что увеличение степени пористости изоляции приводит к увеличению волнового сопротивления, а увеличение диаметра – к его уменьшению, что соответствует вычитанию управляемых координат $y_1 - y_2$, как это и показано на рис. 1. Поэтому можно предложить введение межконтурной связи, которая при появлении отклонения степени пористости обеспечивает соответствующее отклонение диаметра изоляции, в результате чего происходит взаимная компенсация их вкладов в волновое сопротивление и оно остается равным заданному номинальному значению.

Таким образом, целью управления многосвязным объектом, показанным на рис. 1, является стабилизация его управляемой координаты P при изменении как задающих, так и возмущающих воздействий двухконтурной системы.

Для достижения данной цели предлагается введение межконтурной связи, благодаря которой при появлении возмущенного процесса и ошибки управления в медленнодействующем контуре формируется эквивалентная ошибка управления в быстродействующем контуре и происходит их взаимная компенсация при формировании обобщенного параметра P .

Для получения максимальной эффективности управления и минимизации возможных отклонений обобщенного параметра P следует определить наилучшие точки подключения межконтурной связи, ее структуру и оптимизировать параметры. Причем в зависимости от конкретных требований, предъявляемых к проектируемой многосвязной системе, оптимизация может проводиться по различным методам, к примеру методам Гаусса – Зейделя, Циглера – Николса и др.

Для выявления наилучших точек подключения межконтурной связи произведено сравнение динамических характеристик двух структур (рис. 3, рис. 4).

В качестве ПФ элементов системы будем использовать непрерывные ПФ регуляторов и объектов управления. В качестве объекта управления верхнего контура рассмотрим ПФ вида (1), нижнего контура ПФ вида (2):

$$W_{oy1}(p) = \frac{K_{oy1}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \cdot \frac{1}{T_{31}^2 p^2 + 2\xi T_{31} p + 1}; \quad (1)$$

$$W_{oy2}(p) = \frac{K_{oy2}}{T_4 p + 1} \cdot \frac{1}{T_{32}^2 p^2 + 2\xi T_{32} p + 1}; \quad (2)$$

$$W_p(p) = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p. \quad (3)$$

Параметры объекта определены экспериментально [2]:

$$K_{oy1} = 1,5; K_{oy2} = 1; T_{31} = 0,8c; T_{32} = 0,08c; \xi = 0,4; T_4 = 2c; T_1 = 2,24c; T_2 = 1,56c.$$

Для объектов, используемых в локальных контурах, рекомендовано применять ПИД-регуляторы вида (3). Оптимальные настройки регуляторов подобраны известным методом Гаусса – Зейделя по имитационной модели системы [5].

Оптимальные параметры регулятора верхнего контура: $k_p = 0,2; k_i = 0,1; k_d = 0,5$, нижнего контура: $k_p = 0,4; k_i = 0,12; k_d = 1,42$.

На рис. 1, 3, 5 введены следующие обозначения: x_1 и x_2 – задающие воздействия локальных САУ; W_{p1} и W_{p2} – передаточные функции регуляторов; W_{oy1} и

W_{oy2} – передаточные функции объектов управления; y_1 и y_2 – выходные координаты локальных САУ (частные параметры качества); P – обобщенный параметр.

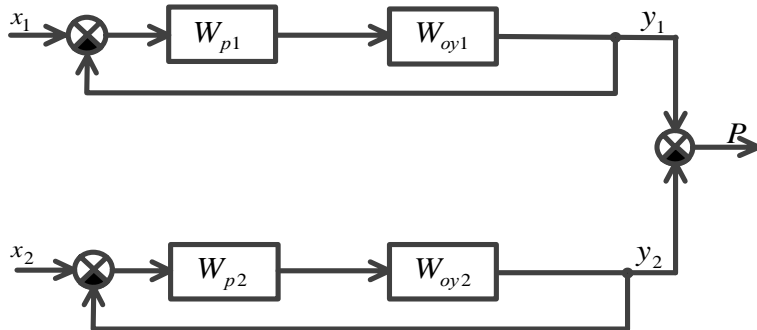


Рис. 1. Структурная схема многосвязного объекта

С использованием имитационной модели системы, реализованной в Simulink, построены динамические характеристики системы как по выходам частных параметров y_1 и y_2 , так и по выходу обобщенного параметра P . Для исследования динамических характеристик системы многосвязного управления на оба входа двухконтурной системы поданы единичные ступенчатые воздействия. В статике данным входным воздействием должно соответствовать нулевое значение обобщенного параметра P . На рис. 2 показаны графики возмущенных процессов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ и график результирующей временной зависимости обобщенного параметра P .

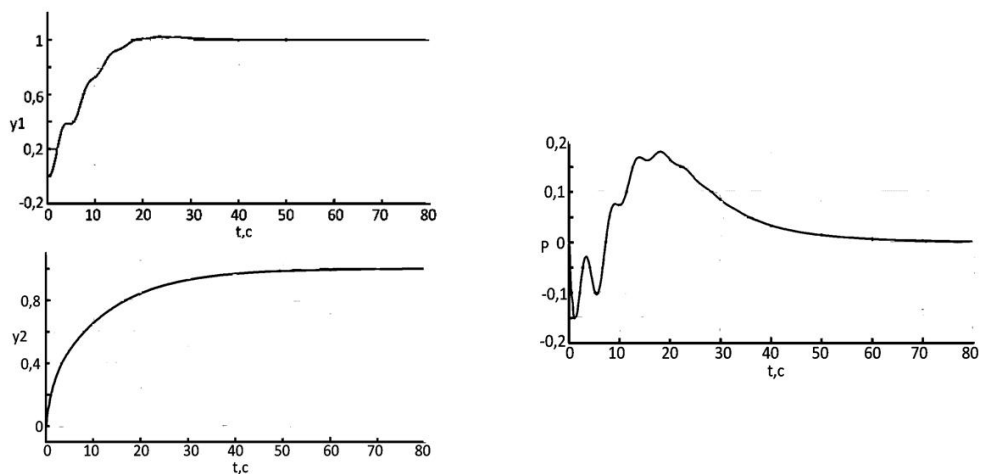


Рис. 2. Переходные процессы многосвязной системы

Рассмотрим перекрестное регулирование многосвязной системы. Принцип построения данной системы заключается в подаче воздействия отклонения верхнего контура в сумматор нижнего контура и подаче воздействия отклонения нижнего контура в сумматор верхнего контура [4].

В перекрестных связях использовали межконтурный пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (МКР ПИД) (см. рис. 3). Проведены исследования, получены переходные процессы по выходу y_1 , y_2 и P . На входы задающих воздействий многосвязной системы было подано единичное ступенчатое воздействие.

По результатам исследований выяснилось, что наилучшего результата при использовании специального блока Signal Constraint библиотеки Simulink можно достичь при отрицательном перекрестном регулировании. Для нахождения наилучших параметров блок использует алгоритм последовательного программирования и квазиньютоновский метод градиентного поиска.

Данный вид регулирования заключается в следующем: воздействие отклонения (ВО) верхнего контура вычитается из задающего воздействия и воздействия обратной связи (ОС) нижнего контура и соответственно ВО нижнего контура вычитается из задающего воздействия и воздействия ОС верхнего контура (см. рис. 3) [4]. Для получения динамических характеристик системы использовалась имитационная модель, реализованная в Simulink [6].

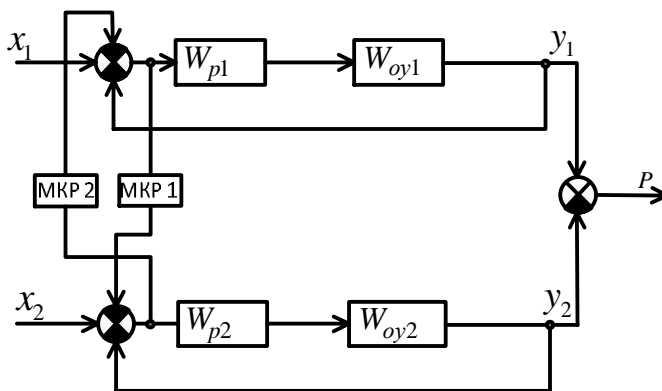


Рис. 3. Структурная схема перекрестного управления с МКР ПИД

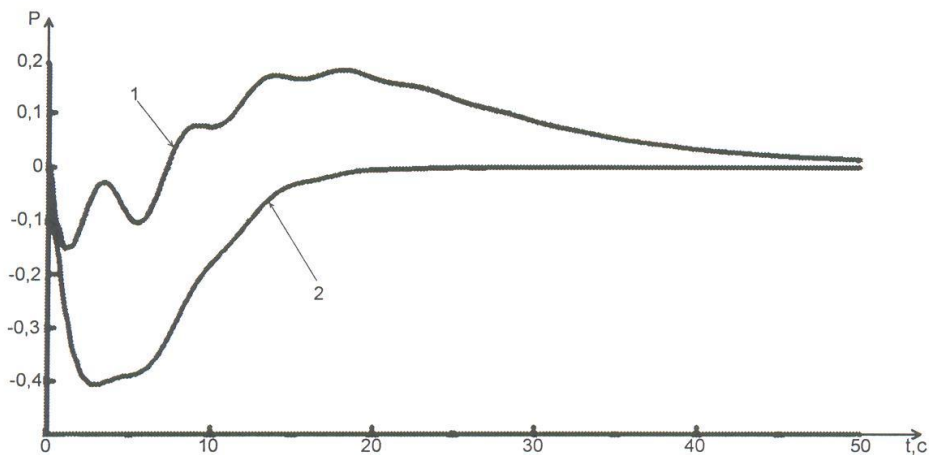


Рис. 4. Переходные процессы многосвязной системы по выходу обобщенного параметра P :
1 – без использования перекрестного управления; 2 – с использованием перекрестного управления

После проведения оптимизации параметров межконтурного регулятора с использованием блока Signal Constraint получены следующие оптимальные значения параметров регуляторов:

– МКР 1: $k_p = 1,12 \cdot 10^{-5}$; $k_i = 2,24 \cdot 10^{-5}$; $k_d = 5 \cdot 10^{-3}$;

– МКР 2: $k_p = 0,001$; $k_i = 3,36 \cdot 10^{-4}$; $k_d = 2,17 \cdot 10^{-5}$.

Сравним полученные динамические характеристики с динамическими характеристиками, полученными без использования перекрестного управления (рис. 4).

После сравнения динамических характеристик с перекрестным управлением и без него можно сказать, что данный метод оптимизации ПИД-регулятора, выполненный средствами Simulink, приводит к улучшению характеристик на выходах частных параметров y_1 , y_2 многосвязной системы, а также P .

Сравнивая динамические характеристики по выходу обобщенного параметра (рис. 4), можно сказать, что построение многосвязной системы по перекрестному типу привело к улучшению характеристик системы. Время переходного процесса уменьшилось приблизительно на 25–30 %.

Принцип построения многосвязной системы с перекрестным управлением, представленной на рис. 5, заключается в вычитании управляющей координаты (УК) верхнего контура из УК нижнего контура и наоборот УК нижнего контура из УК верхнего контура. В перекрестных связях использовался МКР ПИД. При использовании схемы, в которой УК верхнего контура суммируется с УК нижнего контура и УК нижнего контура суммируется с УК верхнего контура, переходные процессы как по выходам частных параметров, так и по выходу обобщенного параметра при оптимальных настройках получались неудовлетворительными и не решали поставленной задачи. Далее для оптимизации будем применять структурную схему, изображенную на рис. 5.

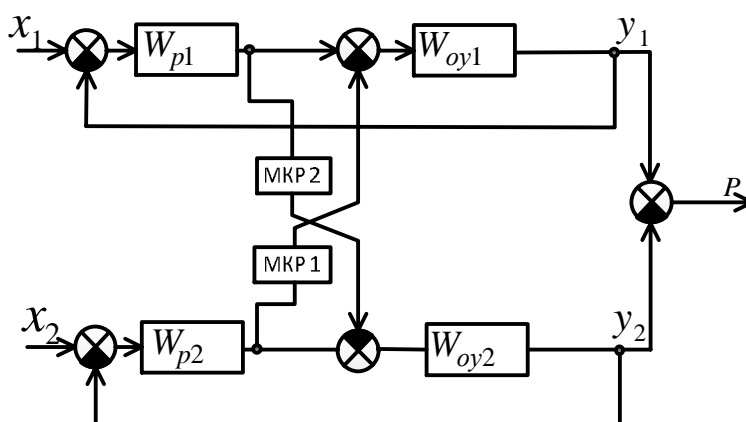


Рис. 5. Структурная схема комбинированного управления

После проведения оптимизации параметров межконтурных регуляторов с использованием блока Signal Constraint получены следующие оптимальные значения параметров регуляторов:

– МКР 1: $k_p = -3,13$; $k_i = -1,18 \cdot 10^{-3}$; $k_d = 5,21$;

– МКР 2: $k_p = 3,13$; $k_i = -3,3 \cdot 10^{-3}$; $k_d = 0,26$.

Сравним полученные динамические характеристики с динамическими характеристиками, полученными без использования перекрестного управления (рис. 6).

После сравнения динамических характеристик с перекрестным управлением и без него можно сказать, что данный метод оптимизации ПИД-регулятора, сделанный

средствами Simulink, приводит к улучшению характеристик на выходе y_1, y_2 и P .

С применением перекрестного управления второго вида по выходу обобщенного параметра время переходного процесса сократилось приблизительно на 30–35 % (рис. 6).

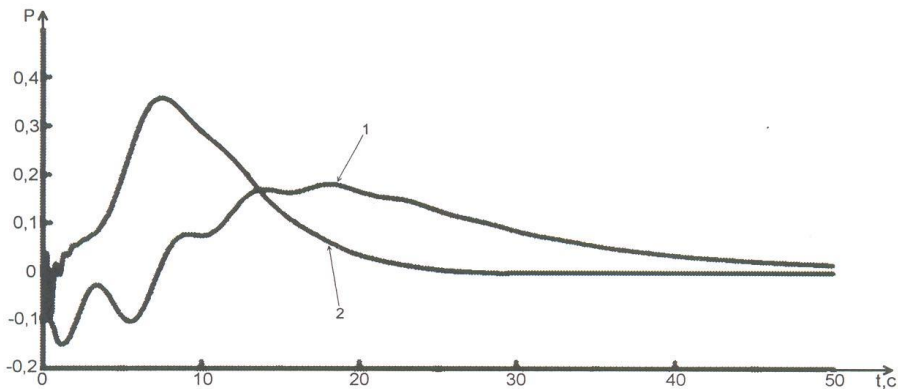


Рис. 6. Переходные процессы многосвязной системы по выходу обобщенного параметра P :
1 – без перекрестного управления; 2 – с перекрестным управлением

С учетом возможной многоэкстремальности поверхности значений критерия оптимальности в области возможных настроек регулятора окончательная оптимизация ПИД-регулятора произведена симплексным методом на примере односвязного объекта управления верхнего контура, что дало существенное улучшение характера возмущенного процесса, показанного на рис. 7.

Регулярным симплексом в пространстве R^n называется правильный многогранник, образованный $(n + 1)$ -ми равноотстоящими друг от друга вершинами. Для случая $n = 2$ это равносторонний треугольник, для случая $n = 3$ – тетраэдр, где n – число оптимизируемых параметров [7, 8].

Если в пространстве R^n необходимо построить регулярный симплекс, одна из вершин которого находится в точке $X^0 = (x_1^0; x_2^0 \dots x_n^0)$, то координаты вершин такого симплекса удобно задавать с помощью $n \cdot (n + 1)$ -матрицы:

$$R_{n \times (n+1)} = \begin{pmatrix} x_1^0 & x_1^0 + r_1 & x_1^0 + r_2 & \dots & x_1^0 + r_2 \\ x_2^0 & x_2^0 + r_2 & x_2^0 + r_1 & \dots & x_2^0 + r_2 \\ x_3^0 & x_3^0 + r_2 & x_3^0 + r_2 & \dots & x_3^0 + r_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^0 & x_n^0 + r_2 & x_n^0 + r_2 & \dots & x_n^0 + r_1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

В матрице $R_{n \times (n+1)}$ каждый i -й столбец представляет собой координаты i -й вершины симплекса, $i = \overline{1..(n+1)}$. Параметры r_1 и r_2 рассчитываются по формулам

$$r_1 = l \frac{\sqrt{n+1} + n - 1}{n\sqrt{2}}; \quad (5)$$

$$r_2 = l \frac{\sqrt{n+1} - 1}{n\sqrt{2}}, \quad (6)$$

где l – длина ребра симплекса.

В алгоритме симплекс-метода используется следующее важное свойство регулярного симплекса: если одну из вершин регулярного симплекса перенести на надлежащее расстояние вдоль прямой, соединяющей данную вершину и центр тяжести оставшихся вершин, то вновь получится регулярный симплекс.

Пусть $X_i^r, i = \overline{1..(n+1)}$ – векторы координат вершин регулярного симплекса. Тогда при выполнении операции отражения k -й вершины симплекса имеет место следующая связь координат этой вершины и новой вершины:

$$\frac{X_k^r + X_k^{r+1}}{2} = X_c^r. \quad (7)$$

Здесь $X_c^r = \frac{1}{n} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n+1} X_i^r$ – вектор координат центра тяжести остальных вершин

симплекса (за исключением отраженной вершины k).

Таким образом, после отражения k -й вершины симплекса с координатами вершин $X_i^r, i = \overline{1..(n+1)}$ получаем новый симплекс с координатами вершин:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i^{r+1} = X_i^r, i = \overline{1..(n+1)}, \text{ при } i \neq k \\ X_k^{r+1} = 2X_c^r - X_k^r \end{array} \right\}. \quad (8)$$

Описанным методом проведена оптимизация настроек регулятора верхнего контура по минимуму среднеквадратичного критерия (9). Непрерывный ПИД-регулятор можно представить ПФ в виде (3).

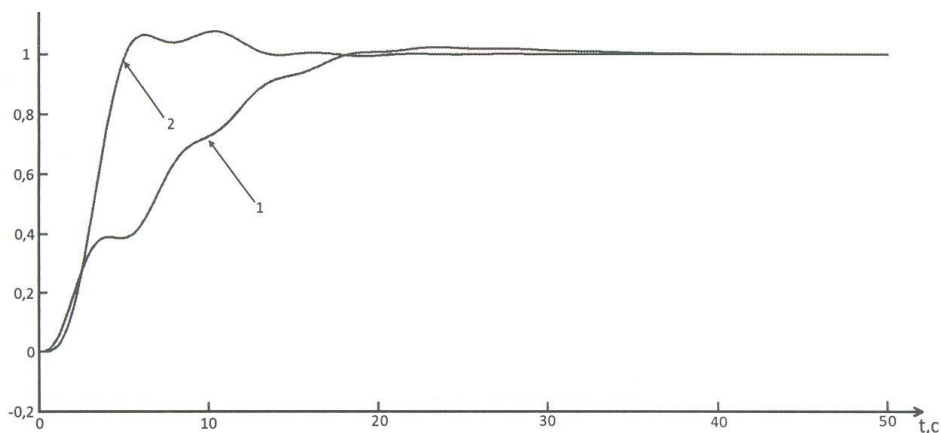


Рис. 7. Переходные процессы по выходу верхнего контура:

1 – метод настройки по имитационной модели; 2 – метод симплекс-оптимизации ПИД-регулятора

Перемещением симплекса по плоскости настроек регулятора до ситуации, когда симплекс перестает перемещаться, а начинает вращаться, определена точка, соответствующая оптимальности всей системы связанного управления:

$$J = \int e^2(t) dt \rightarrow \sum_{k=1}^N e^2(k) \rightarrow \min. \quad (9)$$

После проведения оптимизации ПИД-регулятора по вышеописанному методу с ОУ вида (1) получили, что значение критерия оптимальности при новых рассчитанных параметрах регулятора, заданных первой вершиной симплекса, стало наименьшим, равным 2,645. Аналогичным пересчетом настроек регулятора получены параметры регулятора $k_p = 0,555$, $k_i = 0,237$ и $k_d = 0,027$, соответствующие минимуму (9).

Как видно из рис. 7, при применении симплекс-метода оптимизации появилось перерегулирование, время переходного процесса сократилось приблизительно на 50 %. Тем самым динамические характеристики по выходу обобщенного параметра также улучшатся.

В заключение можно отметить, что выбранные в качестве показателей эффективности время переходного процесса и интегральная ошибка показали, что обе структуры практически эквивалентны и могут выбираться на основе сравнения простоты их реализации. Если данные структурные решения не в полной мере обеспечивают улучшение динамики системы, то рекомендуется применять симплексный метод оптимизации параметров регуляторов в многосвязной системе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисов В.Ю., Чостковский Б.К. Двухконтурная система управления обобщенным параметром // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – Вып. 36.
2. Чостковский Б.К. Методы и системы оптимального управления технологическими процессами производства кабелей связи: Монография. – М.: Машиностроение, 2009. – 190 с.: ил.
3. 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.
4. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука; Главная редакция физико-математической литературы, 1975. – 768 с.
5. Ключев А.С. Автоматическое регулирование. – М.: Энергия, 1967. – 344 с.
6. Образовательный математический сайт [Электронный ресурс]. Электрон. дан. – М.: 15.03.12. – Режим доступа <http://www.exponenta.ru>, свободный. Загл. с экрана – Яз. рус.
7. Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М.: Мир, 1977. – 447 с.
8. Кузин Л.Т. Основы кибернетики. – М.: Энергия, 1973. – 503 с.

Статья поступила в редакцию 1 июля 2013 г.

OPTIMIZATION OF MULTICONNECTION CONTROL BY MEANS OF THE SIMPLEX METHOD

B.K. Chostkovsky¹, V.U. Denisov², A.I. D'yakonov¹

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

The use of various kinds of cross-regulation in multivariable generalized parameter control system, and the application of the simplex method for optimization of controller parameters are discussed.

Keywords: *multivariable system, cross-regulatory, intercontour controllers, generalized parameter, regular simplex.*

*Boris K. Chostkovsky (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Artem I. D'yakonov, Graduate student.
Vladimir U. Denisov, Engineer.*