



СОВРЕМЕННАЯ НАУКА:
АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И
ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

№ 5/6 - 2014 (май/июнь)

Учредитель журнала
Общество с ограниченной
ответственностью
«НАУЧНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

Редакционный совет

- А.В. Царегородцев** — д.т.н., профессор Финансового университета при Правительстве Российской Федерации
Ю.Б. Миндлин — к.э.н., доцент Московского государственного индустриального университета
М.М. Безрукова — д.б.н., профессор, директор Института возрастной физиологии РАО
Н.Н. Грачев — профессор Московского государственного института электроники и математики НИУ ВШЭ, доктор высшей степени в области технических наук (Doctor Habilitatus)
А.И. Гусева — д.т.н., профессор Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ"
А.Я. Качанов — д.воен.н., профессор Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ)
А.И. Квасов — д.т.н., профессор, академик Казахской Национальной Академии естественных наук, профессор Восточно-Казахстанского государственного технического университета имени Д.Серикбаева
С.М. Надежкин — д.б.н., профессор Всероссийского НИИ селекции и семеноводства овощных культур Россельхозакадемии
Б.А. Прудковский — д.т.н., профессор, эксперт по высшему образованию группы компаний "ИНТЕРСЕРТИФИКА"
С.Э. Саркисов — д.м.н., профессор Научного центра акушерства, гинекологии и перинатологии
В.В. Сергиевский — д.х.н., профессор Национального исследовательского ядерного университета "МИФИ"
А.П. Симоненков — д.м.н., профессор Института хирургии им. Вишневского РАМН

Издатель: Общество с ограниченной ответственностью
«Научные технологии»

Адрес редакции и издателя:
109443, Москва,
Волгоградский пр-т, 116–1–10
Тел./факс: 8(495) 755–1913
E-mail: redaktor@nauteh-journal.ru
http://www.nauteh-journal.ru
http://www.vipstd.ru/nauteh

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору
в сфере массовых коммуникаций, связи
и охраны культурного наследия.
Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77–44912 от 04.05.2011 г.

© Современная наука:
Актуальные проблемы теории и практики



В НОМЕРЕ:

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ,
УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
И ПРОИЗВОДСТВАМИ (ПО ОТРАСЛЯМ)
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА
ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ
ГИДРОЛОГИЯ СУШИ, ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ,
ГИДРОХИМИЯ
НЕЙРОХИРУРГИЯ
СЕРДЕЧНОСОСУДИСТАЯ ХИРУРГИЯ

Журнал издается с 2011 года

Редакция:
Главный редактор
А.В. Царегородцев
Выпускающий редактор
Ю.Б. Миндлин
Верстка
Д.М. Замятин

Подписной индекс издания
в каталоге агентства "Почта России" — 80016

В течение года можно произвести подписку
на журнал непосредственно в редакции

Авторы статей
несут полную ответственность за точность
приведенных сведений, данных и дат

При перепечатке ссылка на журнал
«Современная наука: Актуальные проблемы
теории и практики» обязательна

Журнал отпечатан в типографии
ООО "ТИПОГРАФИЯ АЗАЛИТ"
тел./факс: (495) 973–8296
Подписано в печать 28.06.2014 г.
Формат 84×108 1/16

Печать цифровая
Заказ № 0000
Тираж 2000 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Д.А.Быстров

Разработка и исследование алгоритмов адаптации и стабилизации в системе управления летательного аппарата.
D. Bystrov – Development and research of adaptation and stabilization algorithms in the system of an aircraft..... 3

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ И ПРОИЗВОДСТВАМИ (ПО ОТРАСЛЯМ)

В.Н. Азарсков, Л.С. Житецкий, К.Ю. Соловчук

Управление многосвязными технологическими процессами в условиях неопределенности с использованием концепции обобщенного инвертирования.
V. Azarskov, L. Zhiteckii, K. Solovchuk – Interconnected process control under uncertainty conditions by using a generalized inversion concept. 11

В.Н. Азарсков, Л.С. Житецкий, С.А. Николаенко

Асимптотика процессов последовательного обучения нейронных сетей в стохастической среде: специальный случай.
V. Azarskov, L. Zhiteckii, S. Nikolaienko – Asymptotics of sequential learning processes for neural networks in stochastic environment: special case. 21

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ МАТЕМАТИКА

Л.В. Плетнев, Л.А. Данилович, М.Г. Концевой, А.А. Самосадов

Статистические исследования определителей третьего порядка.
L. Pletnev, L. Danilovich, M. Kantsavy, A. Samasadau – Statistical research of the third range determinantes. 29

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

Т.В. Емельянова, А.М. Кольчатов

Итерационный метод решения систем матричных уравнений.
T. Emelyanova, A. Kolchatov – Iterative method for solving systems of matrix equations..... 34

А.М. Кольчатов, Т.В. Емельянова

Имитационное моделирование в задачах динамического программирования.
A. Kolchatov, T. Emelyanova – Simulation modeling dynamic programming problems. 39

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

А.Ф. Аббуд, И.М. Сенан

Синтез 1-адамантилтриазолтионов.
A. Abbood, I. Senan – Synthesis of 1-adamantyl triazole thiones 45

ГИДРОЛОГИЯ СУШИ, ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ, ГИДРОХИМИЯ

Е.Д. Гопченко, В.Г. Явкин, А.А. Мельник

Нормирование расчетных характеристик дождевых паводков Карпато-Подольского региона.
E. Gopchenko, V. Yavkin, A. Melnyk – Rationing of calculated characteristics of rainfall floods in Carpatho-Podolye region..... 50

НЕЙРОХИРУРГИЯ

Н.В. Глаголев, Т.Н. Козлитина

Частота сочетания сколиотической деформации позвоночника у детей с аномалией Киари 1.
N. Glagolev, T. Kozlitina – The frequency of the combination of the scoliosis in children with Chiari malformation type 1. 55

СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТАЯ ХИРУРГИЯ

И.Н. Староверов, О.М. Лончакова

Использование временной внутрипросветной баллонной окклюзии при повторных реконструкциях магистральных артерий нижних конечностей.
I. Staroverov, O. Lonchakova – The use of a method of time endoluminal balloon occlusion after reoperations on main arteries of lower limbs..... 59

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ АДАПТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Д.А. Быстров

Арзамасский политехнический институт (филиал)
Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева
manhattan.real@gmail.com

Аннотация. Предложен метод выбора коэффициентов передачи регулятора контура стабилизации перегрузки продольного канала летательного аппарата. Разработаны вычислительные алгоритмы адаптации и стабилизации для бортовой цифровой вычислительной машины. Работоспособность разработанных алгоритмов подтверждена результатами математического моделирования на цифровом комплексе моделирования.

Ключевые слова: система стабилизации, регулятор, канал, алгоритм адаптации, переходный процесс.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF ADAPTATION AND STABILIZATION ALGORITHMS IN THE SYSTEM OF AN AIRCRAFT

Bystrov D.A.

Arzamas Polytechnic Institute (branch)
of the Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev

Abstract. Selection method of gain ratios for the aircraft longitudinal channel stabilization overload circuit regulator is offered. Computing algorithms of adaptation and stabilization are developed for the onboard digital computer. Efficiency of the algorithms is confirmed with results of mathematical simulation on a digital complex of simulation.

Keywords: stabilizing system, regulator, channel, adaptation algorithm, transient response.

Введение

Современный этап развития систем управления полетом характеризуется широким внедрением принципов адаптации, применением БЦВМ для формирования алгоритмов управления, повышением надежности средств получения и переработки информации и исполнения команд управления.

Известно, что динамические свойства летательного аппарата без бортовой системы стабилизации не обеспечивают требуемую точность управления [5]. Благоприятное влияние системы стабилизации на процесс управления проявляется в обеспечении высокого качества переходных процессов отработки входных команд управления и внешних возмущающих воздействий [7].

Целью работы является разработка алгоритмов регулятора контура стабилизации (КС) перегрузки продольного канала, являющегося частью трехканальной системы стабилизации беспилотного ЛА. Отличительной особенностью работы является практическое подтверждение важного преимущества использования БЦВМ, позволяющего реализовать принцип аппаратной унификации систем управления для разных ЛА. Синтез алгоритмов должен быть произведен с учетом структуры и аппаратной реализации уже существующей системы управления, испытанной в реальных полетах с конкретным ЛА. Требуется только за счет изменения рабочих программ алгоритмов БЦВМ обеспечить применение ЛА с другими аэродинамическими характеристиками. Разработка алгоритмов регулятора КС перегрузки является частью этой задачи.

Ранее синтез контуров стабилизации производился, в сущности, вручную. В целях сокращения времени синтеза и улучшения качества результатов в работе была поставлена и решена задача автоматизировать процесс проектирования.

Для достижения сформулированной цели поставлены и решены следующие задачи:

- произвести выбор коэффициентов передачи линейного аналогового прототипа регулятора для выбранных режимов полета;
- разработать соответствующие вычислительные алгоритмы адаптации и стабилизации для БЦВМ;
- произвести проверку работоспособности синтезированных алгоритмов с учетом всех особенностей реализации регулятора на цифровом комплексе моделирования (ЦКМ).

Основная часть

В большинстве случаев КС короткопериодического движения беспилотного летательного аппарата строится по двухконтурной схеме [3]. При этом внутренний контур демпфирования всегда замыкается по информации об угловой скорости. Внешний контур может замыкаться по информации об угле тангажа или нормальной перегрузке.

По заданию определена исходная структурная схема КС с замыканием главной обратной связи по перегрузке. Это обусловлено ее преимуществами при решении конкретных задач, определенных в техническом задании на разработку системы управления. Эти преимущества [6] сводятся к следующему:

- более высокое быстродействие при обработке заданных значений управляющего сигнала;
- практически постоянная пропорциональная зависимость между сигналом управления (наведения) и достигаемой при этом управляющей нормальной силой во всем диапазоне применения;
- обеспечивается более высокая точность стабилизации в прямолинейных режимах полета в турбулентной атмосфере;
- при наличии интеграла по отклонению от заданной перегрузки обеспечивается инвариантность

по отношению к изменению балансирующего угла атаки в прямолинейных режимах полета;

- при построении траекторного контура стабилизации высоты его передаточные коэффициенты мало зависят от изменения динамических коэффициентов ЛА;
- простая реализация заданных ограничений на величину угла атаки и нормальных перегрузок.

Вариант с замыканием главной обратной связи по перегрузке реализован во всех системах управления разработки ОАО «АНПП «Темп-Авиа» для беспилотных ЛА и обеспечивает формирование траекторий, включающих подавляющее большинство разнообразных участков выполнения требуемых маневров. Заданная структурная схема регулятора контура стабилизации продольного канала ЛА [2] с замыканием главной обратной связи по перегрузке приведена на рисунке 1.

Контур стабилизации в данной работе является цифро-аналоговым. Внутренний контур демпфирования, замыкаемый по информации об угловой скорости, является аналоговым. Внешний контур замыкается по цифровой информации о перегрузке. Необходимая для замыкания обратных связей контура стабилизации информация поступает с датчиков первичной информации БИНС (датчика угловых скоростей (ДУС) и датчика линейных ускорений (ДЛУ)).

Известно, что ЛА является очень сложным объектом управления. Его движение описывается системой обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений [4]. При этом задача управления, формулируемая в математической теории управляемого движения как двухточечная задача, не может быть решена в аналитическом виде. На практике задача управления эффективно решается приближенно с использованием различных методов [1]. К ним относятся:

- декомпозиция, сводящаяся к разделению полного пространственного движения на разные группы по темпу движения или по отдельным степеням свободы;

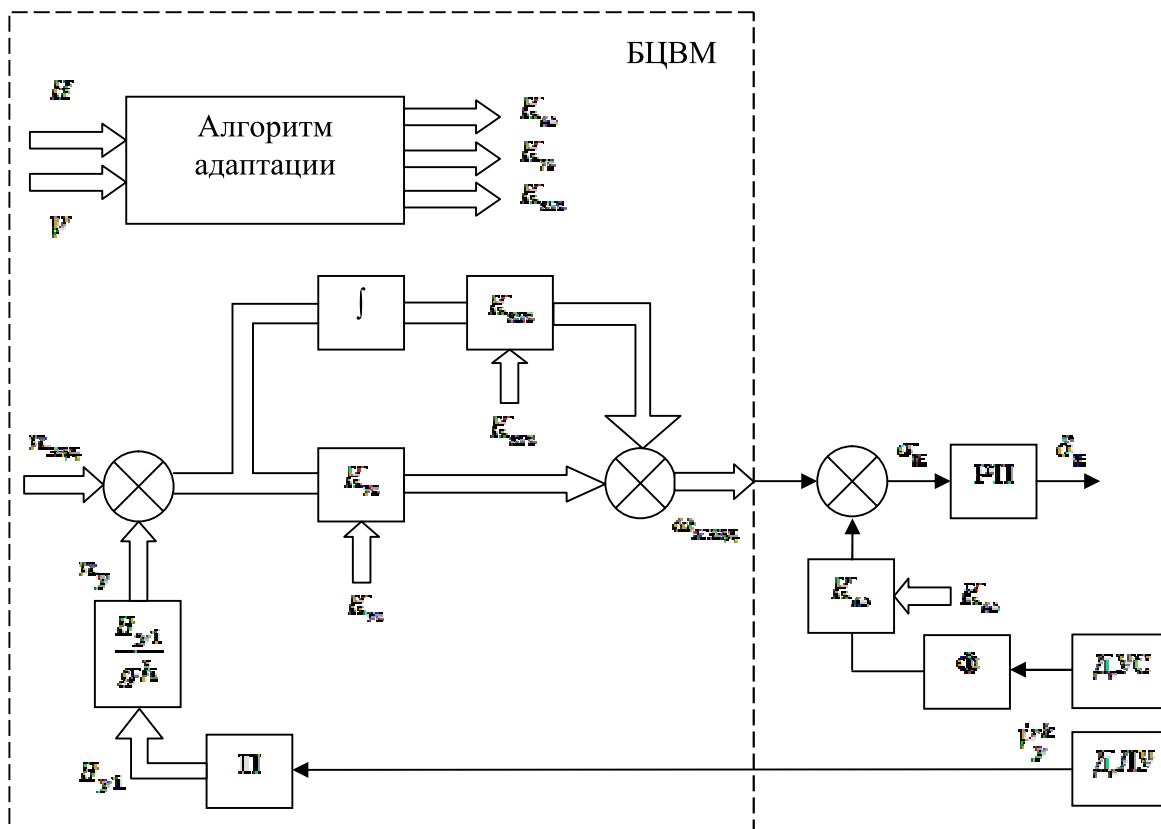


Рис. 1. Структурная схема регулятора КС

- линеаризация уравнений относительно малых отклонений координат состояния от их значений для некоторого возмущенного движения.

С учетом того, что стабилизация осуществляется в режиме малых отклонений координат состояния, при синтезе КС используются линеаризованные уравнения в виде (1):

$$\begin{cases} \ddot{\vartheta} + a_{11}\dot{\vartheta} + a_{12}\alpha = -a_{13}\delta_{\sigma}; \\ \dot{\theta} - a_{42}\alpha = a_{43}\delta_{\sigma}; \\ \vartheta - \theta - \alpha = 0; \\ n_y = \frac{V}{g}\dot{\theta}, \end{cases} \quad (1)$$

где ϑ – угол тангажа;

α – угол атаки;

δ_{σ} – отклонение руля высоты;

θ – траекторный угол.

n_y – перегрузка;

a_{11} , a_{12} , a_{13} , a_{42} , a_{43} – динамические коэффициенты.

При разработке алгоритмов стабилизации эффективно использованы разнообразные, хорошо отработанные методы синтеза линейных систем. В данной работе поиск требуемых коэффициентов передачи регулятора контура в автоматическом режиме осуществляется с помощью библиотеки оптимизации *Matlab*. В качестве инструмента для моделирования контура стабилизации продольного движения ЛА используется *Simulink* (программная среда *Matlab*). Формульные зависимости коэффициентов передачи от скоростного напора получены в результате аппроксимации по специально разработанной программе в среде *Matlab*.

Обязательным этапом процесса разработки контура стабилизации короткопериодического движения является подтверждение работоспособности выбранных алгоритмов методом математического моделирования с максимально полным описанием моделей ЛА, составных частей КС и особенностей практической реализации в БЦВМ.

На первом этапе синтеза КС производится выбор параметров для аналогового прототипа с использованием хорошо отработанных методов синтеза непрерывных систем.

Структурная схема КС перегрузки с объектом управления, соответствующим линеаризованным уравнениям движения (1), и регулятором контура реализована в *Simulink*.

КС обрабатывает возмущающее воздействие заданной перегрузки. На вход подается единичный ступенчатый сигнал, который затем обрабатывается динамическими операторами рулевого привода, датчика угловых скоростей и противоизгибного фильтра. Во внутренний контур демпфирования включен коэффициент передачи по угловой скорости. Во внешний контур перегрузки включены коэффициент передачи по перегрузке и по интегралу отклонения от заданной перегрузки. Возмущающий сигнал обрабатывается без статической ошибки, что объясняется наличием астатического звена во внешнем контуре стабилизации перегрузки.

По существу, процесс проектирования в данной работе представляет собой определение коэффициентов передачи регулятора для каждого режима полета ЛА и их дальнейшей аппроксимации. Для любого из режимов необходимо найти такие коэффициенты, при которых переходный процесс будет удовлетворять предъявленным требованиям.

Для решения задачи поиска требуемых коэффициентов в автоматическом режиме использован GUI-интерфейс "*SISO Design Tool*" из пакета прикладных программ *Control System Toolbox* системы инженерных расчетов *Matlab*. *SISO Design Tool* (*SISO* – *Single Input/Single Output*) представляет собой графический интерфейс пользователя, предназначенный для ана-

лиза и синтеза одномерных линейных (линеаризованных) систем автоматического управления.

Для любого из режимов в несколько итераций осуществляется выбор коэффициентов передачи регулятора, при которых переходный процесс системы будет удовлетворять заданным требованиям. Данный метод определения коэффициентов позволяет путем изменения допустимой зоны процесса регулирования добиться минимальных перерегулирования, времени регулирования и нарастания.

Для завершения алгоритма выбора коэффициентов передачи составлена программа в среде *Matlab*, в которой производится аппроксимация функциональной зависимости коэффициента передачи от скоростного напора полиномом третьей степени.

В результате аппроксимации получены формульные зависимости коэффициентов передачи регулятора контура стабилизации для алгоритма адаптации. Переходные процессы обработки управляющей скачкообразной единичной перегрузки в аналоговом прототипе КС с полученными коэффициентами передачи для каждого режима полета показывают, что система стабилизации перегрузки полета во всех режимах обеспечивает требуемое время переходного процесса и перерегулирование.

При разработке вычислительных алгоритмов регулятора КС были составлены рабочие программы на языке *C++* для алгоритмов адаптации и стабилизации. Алгоритм адаптации (АА) предназначен для вычисления сквозных коэффициентов передачи контура стабилизации в зависимости от условий полета. Блок-схема АА приведена на рисунке 2. Алгоритм стабилизации (АС) предназначен для формирования заданной управляющей скорости, которая является входной величиной аналоговой части КС. Блок-схема АС приведена на рисунке 3.

Для подтверждения работоспособности разработанных алгоритмов контура стабилизации перегрузки проведено математическое моделирование продольного движения ЛА на ЦКМ. ЦКМ представляет собой моделирующую программу (МП), написанную в среде программирования *Borland C++ 6.0*

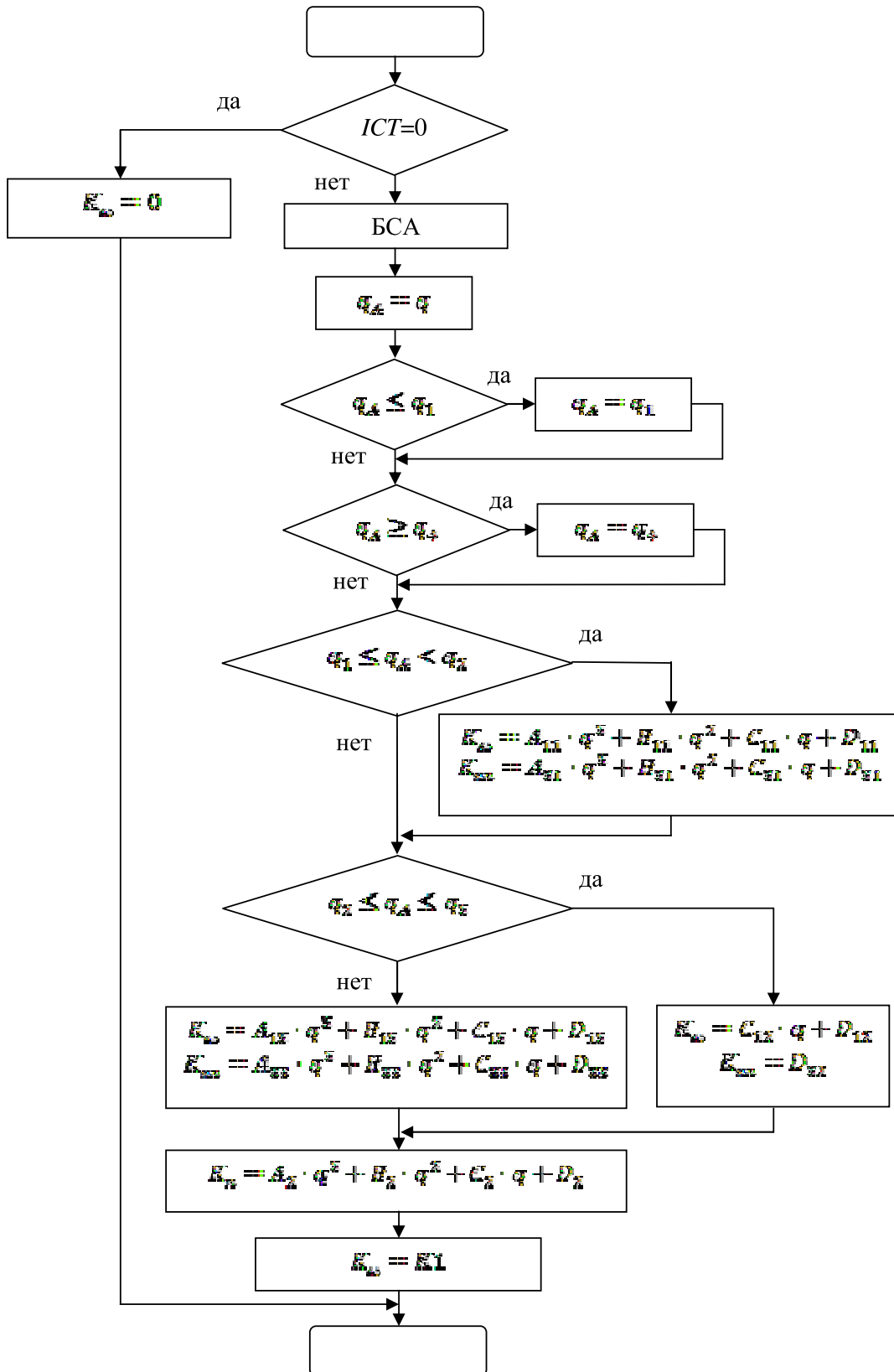


Рис. 2. Блок-схема алгоритма адаптации

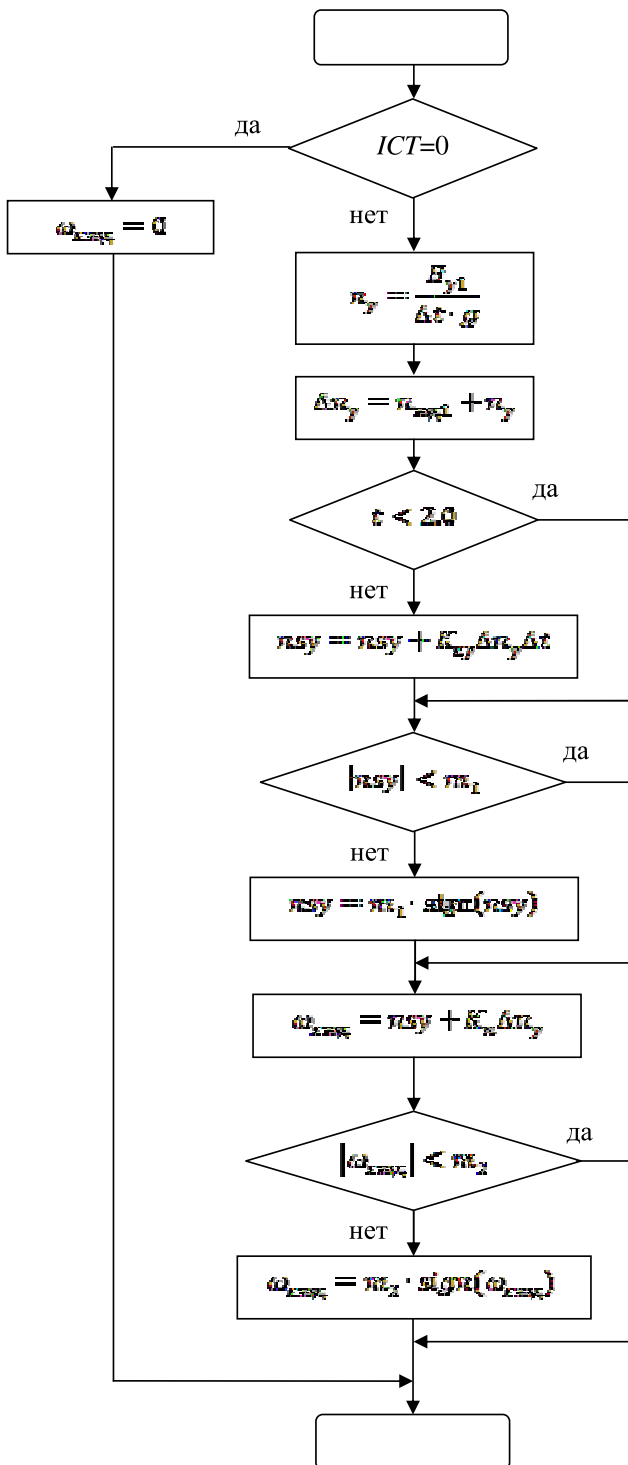


Рис. 3. Блок-схема алгоритма стабилизации

на языке C++. Выбор языка программирования связан с его применением на БЦВМ системы управления ЛА.

Моделирующая программа является имитационной моделью высокого уровня и предназначена для отработки алгоритмов и рабочих программ БЦВМ перед проведением полунатурных и летных испытаний. Уровень моделей, используемых в МП, позволяет получить достоверные результаты для отработки алгоритмов и программ для БЦВМ. Моделирующая программа использует полную пространственную модель ОУ. При этом в ней максимально полно описаны аэродинамические, массо-инерционные и энергетические характеристики.

В ЦКМ введены модули рабочих программ алгоритмов адаптации и стабилизации. На рисунке 4 приведен переходный процесс отработки скачкообразного управляющего сигнала в стационарном режиме полета.

Анализ результатов моделирования показывает, что алгоритмы контура стабилизации перегрузки обеспечивают выполнение требований задания к качеству переходного процесса.

Вторым этапом моделирования является проверка возможности формирования управляемого движения в вертикальной плоскости после пуска с разных высот. Движение по траектории моделируется в виде временной программы изменения заданной перегрузки. Результат моделирования управляемого движения в вертикальной плоскости при $h_0 = 2000$ м приведен на рисунке 5.

Выводы

В результате разработки алгоритмов регулятора контура стабилизации перегрузки продольного канала летательного аппарата последовательно решены следующие задачи:

- произведен синтез контура стабилизации аналогового прототипа с помощью инженерно-прикладного пакета программ *Matlab*;
- осуществлен выбор коэффициентов передачи регулятора в автоматическом режиме с помощью инструмента *SISO Design Tool*, который обеспечивает выполнение требований задания к качеству переходного процесса;

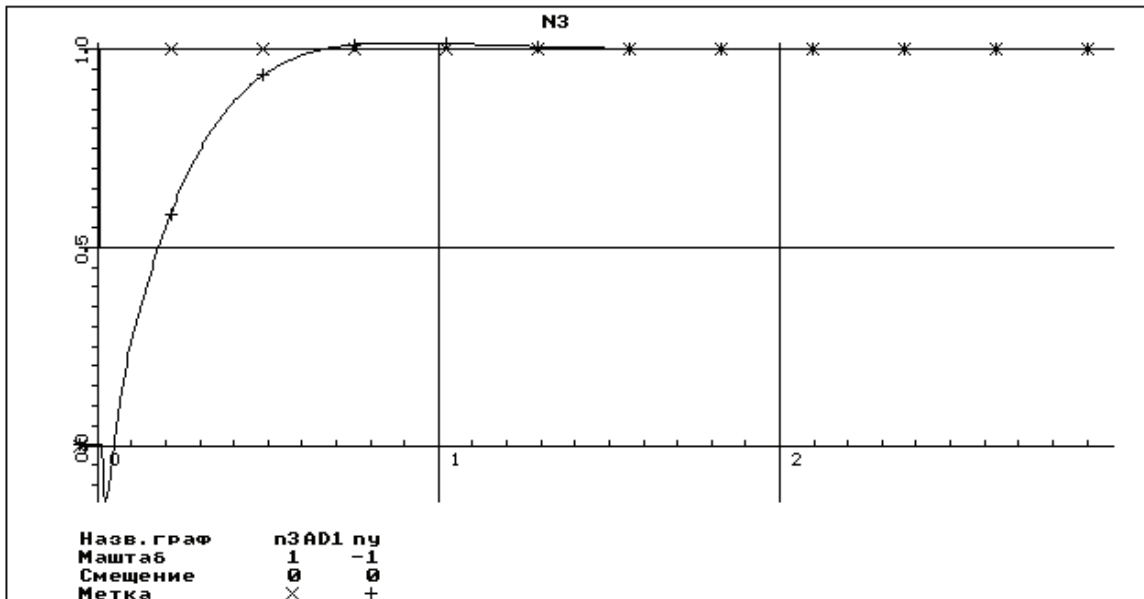


Рис. 4. Переходный процесс для режима $V=336.434$ м/с, $h=1000$ м

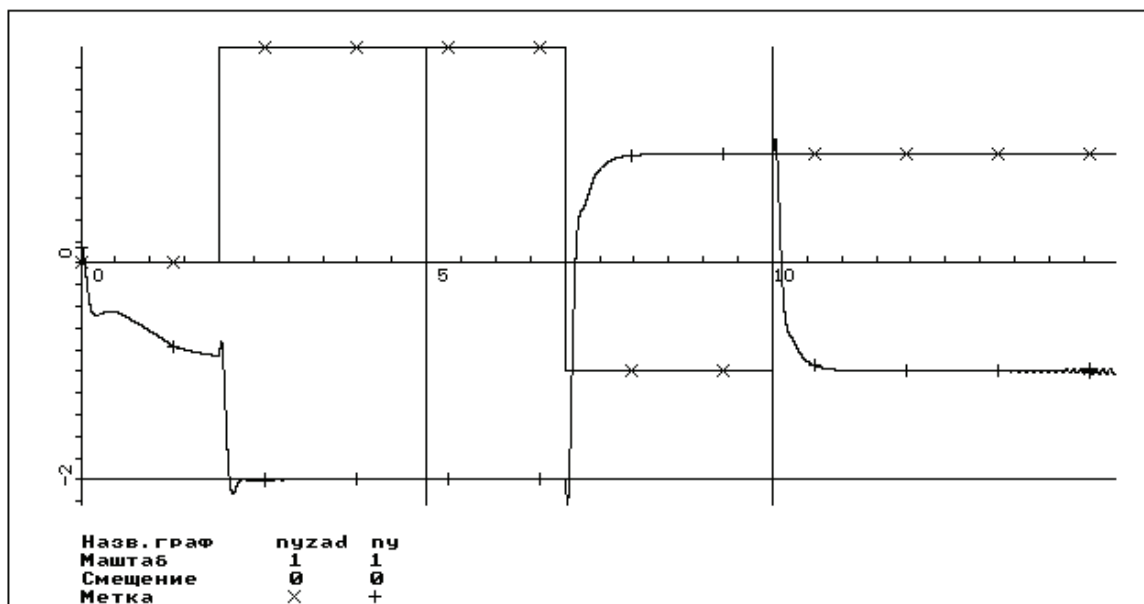


Рис. 5. Обработка управляющего сигнала по перегрузке

- получены формульные зависимости коэффициентов передачи, необходимые для алгоритма адаптации, с помощью разработанной программы, осуществляющей полиномиальную аппрок-

симацию. Вид переходных процессов обработки управляющей перегрузки в аналоговом прототипе КС с полученными коэффициентами передачи подтверждает работоспособность выбранных

структур по обеспечению устойчивости короткопериодического движения ЛА;

- составлены блок-схемы алгоритмов адаптации и стабилизации в соответствии со структурой контура стабилизации и результатами синтеза;
- разработаны модули рабочих программ в соответствии с блок-схемами АА и АС в среде *Borland C++ 6.0* на языке *C++*. Данные модули введены в цифровой комплекс моделирования. Для подтверждения работоспособности разработанных алгоритмов КС перегрузки проведе-

но математическое моделирование продольного движения ЛА на ЦКМ.

Из полученных результатов моделирования следует, что контур стабилизации перегрузки продольного канала ЛА обеспечивает качественную отработку заданных воздействий и устойчивость движения по заданной траектории.

Разработанный алгоритм регулятора КС перегрузки предполагается ввести в трехканальную систему стабилизации конкретного беспилотного ЛА.

Список литературы

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического управления. М.: Наука, 1975.
2. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. - М.: Наука, 1973.
3. Кузовков Н. Т. Системы стабилизации летательных аппаратов. М.: Высшая школа, 1976.
4. Лебедев А. А., Чернобровкин Л. С. Динамика полета. М.: Машиностроение, 1973.
5. Михалев И.А., Окоемов Б.Н. Системы автоматического управления самолетом. М.: Машиностроение, 1987.
6. Остославский И. В. Аэродинамика самолета. М.: Оборонгиз, 1957.
7. Топчеев Ю.И., Потемкин В. Г. Системы стабилизации. М.: Машиностроение, 1974.

УПРАВЛЕНИЕ МНОГОСВЯЗНЫМИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЦЕПЦИИ ОБОБЩЕННОГО ИНВЕРТИРОВАНИЯ

Азарсков В.Н.

д. т.н., зав. кафедрой СУЛА
Национального авиационного университета (Киев)
azarskov@nau.edu.ua

Житецкий Л.С.,

к. т.н., проф. кафедры СУЛА Национального авиационного университета (Киев)
leonid_zhiteckii@i.ua

Соловчук К.Ю.,

аспирант, Международный научно-учебный центр
информационных технологий и систем (Киев)
solovchuk_ok@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена система управления многосвязным технологическим процессом, который может быть описан линейной статической моделью. Передаточная матрица этого процесса как объекта управления априори неизвестна, но известна ограниченная область, к которой принадлежат ее элементы. Предполагается, что эта область может включать элементы, определяющие плохо обусловленные и вырожденные матрицы. В рамках концепции так называемого обобщенного инвертирования предложен новый метод адаптивного управления этими неопределенными объектами, основанный на параметрической идентификации некоторого воображаемого объекта с неизвестной, но невырожденной передаточной матрицей. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: теория автоматического управления, адаптивная система, неопределенность, управление многосвязным технологическим процессом, вырожденная передаточная матрица, обобщенное инвертирование, воображаемый объект.

INTERCONNECTED PROCESS CONTROL UNDER UNCERTAINTY CONDITIONS BY USING A GENERALIZED INVERSION CONCEPT

V.N. Azarskov

National Aviation University (Kiev)

L.S. Zhiteckii

National Aviation University (Kiev)

K.Yu. Solovchuk

Int. Research and Training Center for Inform. Technologies & Systems (Kiev)

Abstract. The interconnected process control system that can be described by a linear static model is considered. The transfer matrix of this process as a control plant is a priori unknown but a bounded region to which its elements belong is known. It is assumed that this region may include elements specifying ill-conditioned and singular matrices. Within the so-called generalized inversion, a new method for the adaptive controlling these uncertain plants based on the parameter identification of a fictitious plant with unknown but non-singular transfer matrix is proposed. Simulation results are given.

Keywords: automatic control theory, adaptive system, uncertainty, interconnected process control, singular transfer matrix, generalized inversion, fictitious plant.

Проблема построения высокоточных систем автоматического управления многосвязными объектами в условиях неконтролируе-

мых возмущений, поставленная несколько десятилетий тому назад, по-прежнему остается актуальной до настоящего времени [1].

Это очень важная проблема как с теоретической, так и с практической точек зрения [2]. Эффективный путь разрешения сформулированной проблемы открывает метод обратного оператора, который в идейном плане восходит к пионерным исследованиям отечественных ученых 60-х годов прошлого столетия, обобщенным в монографии [3].

Применительно к задаче управления непрерывными многосвязными технологическими процессами при наличии неопределенности относительно его математической модели этот метод получил дальнейшее развитие в работе [4]. Последние результаты, полученные в данном направлении исследований, представлены в [1].

К сожалению, реализация метода обратного оператора приводит к ухудшению качества функционирования системы управления, если передаточная матрица линейной модели многосвязного технологического процесса плохо обусловлена. На этот досадный факт в свое время обратили внимание авторы статьи [5], которые занимались прикладными вопросами управления технологическим процессом, происходящим в промышленной дистилляционной колонне. В предельном же случае, когда упомянутая матрица становится вырожденной, метод обратного оператора в «чистом виде» вообще неприменим [6].

В работе [6] установлено, что на основе известного в теории матриц приема так называемого обобщенного обращения (псевдообращения) матриц теоретически можно обеспечить оптимальное управление многосвязным объектом с вырожденной или плохо обусловленной передаточными матрицами. Но для того чтобы реализовать такой прием, необходимо располагать информацией об элементах этих матриц. А они практически всегда точно неизвестны конструктору системы управления. В условиях же параметрической неопределенности традиционно прибегают к адаптивной параметрической идентификации модели объекта непосредственно на самом этапе управления [7, 8].

Для класса многосвязных статических объектов с заведомо невырожденными передаточными матрицами решение задачи адаптивного управления эти-

ми объектами по настраиваемой обратной модели можно найти в монографии [8, п. 7.2]. Между тем, судя по доступным литературным источникам, введенное ранее в [7, р. 202] базовое предположение о невырожденности передаточной матрицы объекта, в задачах адаптивного управления обойти до сих пор не удавалось.

Недавно в работе [9] авторами впервые, по-видимому, получено решение задачи адаптивного управления многосвязными статическими объектами с вырожденными передаточными матрицами. Предложенный в этой работе метод сводится к одновременному адаптивному управлению истинным объектом и другим объектом, выступающим в качестве своего рода воображаемого объекта, по настраиваемой обратной модели этого воображаемого объекта (сама передаточная матрица последнего и ее текущие оценки, уточняемые на этапе адаптации его прямой модели, принудительно строятся как невырожденные матрицы).

В настоящей статье в рамках концепции обобщенного инвертирования на основе разработанного в [9] подхода предлагается решение задачи управления многосвязными технологическими процессами с априори неизвестными, но возможно вырожденными и плохо обусловленными передаточными матрицами линейных статических моделей этих процессов.

Рассматривается непрерывный технологический процесс как многосвязный объект, который в общем случае имеет несколько выходных переменных $y^{(1)}, \dots, y^{(m)}$, подверженных действию приведенных к ним неизмеряемых возмущений $v^{(1)}, \dots, v^{(m)}$, и несколько каналов передачи управляющих воздействий $u^{(1)}, \dots, u^{(r)}$ (обычно $1 \leq r \leq m$), причем каждая i -я переменная $y^{(i)}$ ($i = 1, \dots, m$) может зависеть от всех r управляющих воздействий $u^{(1)}, \dots, u^{(r)}$. При управлении этим процессом на базе средств цифровой вычислительной техники в условиях, когда непрерывные во времени t выходные переменные $y^{(i)}(t)$, доступные для измерения, подвергаются квантованию по времени в моменты $t_1 = T_0, t_2 = 2T_0, \dots, t_n = nT_0$, где T_0 – период квантования. Сами же управляю-

щие воздействия $u^{(i)}(t)$ ($i = 1, \dots, r$) как функции времени t формируемые при таком управлении в каждый n -й дискретный момент $t_n = nT_0$, остаются неизменными в течение всего временного интервала $t \in [nT_0, (n+1)T_0)$, т.е.

$$u^{(i)}(t) = u^{(i)}(nT_0) \text{ при } nT_0 \leq t < (n+1)T_0.$$

Как и в работе [4] ограничимся рассмотрением довольно часто встречающимся на практике режимом функционирования системы управления, когда период T_0 достаточно большой, так что переходные процессы, вызванные скачкообразными изменениями управляющих воздействий в любой n -й дискретный момент времени t_n , практически затухнут к очередному $(n+1)$ -му дискретному времени t_{n+1} . В этом режиме многосвязный технологический процесс правомерно представлять как некоторый статический объект (объект без памяти), описываемый согласно [4, 6] в окрестности так называемой рабочей точки линейным векторно-матричным уравнением

$$y_n = Bu_{n-1} + v_n. \quad (1)$$

В этом уравнении $y_n = [y_n^{(1)}, \dots, y_n^{(m)}]^T$ – m -мерный вектор выходных переменных в n -й дискретный момент времени; $u_n = [u_n^{(1)}, \dots, u_n^{(r)}]^T$ – r -мерный вектор управляющих воздействий; $v_n = [v_n^{(1)}, \dots, v_n^{(m)}]^T$ – вектор аддитивных возмущений, приведенных к выходу объекта;

$$B = \begin{pmatrix} b^{(11)} & \dots & b^{(1r)} \\ \dots & \dots & \dots \\ b^{(m1)} & \dots & b^{(mr)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

- $(m \times r)$ -матрица прямых и перекрестных связей, имеющая смысл передаточной матрицы объекта (1). (Здесь и в дальнейшем t – символ транспонирования и для сокращения записи введено стандартное обозначение $x_n := x(nT_0)$ любой переменной x , принятое в теории дискретных систем управления.) Далее будем рассматривать только такие объекты, где число управляющих воздействий равно числу выходных переменных: $r = m$.

В соответствии с представлениями, развитыми в работах [1, 3, 4, 6], уравнение (1) при отсутствии возмущений ($v_n \equiv \underbrace{[0, \dots, 0]^T}_m$) может играть роль прямой модели объекта (от входа u к выходу y). Параметры этой модели, определяемые элементами $b^{(ij)}$ матрицы B вида (2), на практике обычно точно неизвестны; известны, однако, в ряде случаев их априорные интервальные оценки

$$\underline{b}^{(ij)} \leq b^{(ij)} \leq \bar{b}^{(ij)} \quad (i, j = 1, \dots, m). \quad (3)$$

Подобно тому, как это делается в [4, 6, 8], будем считать, что возмущения $v^{(i)}(t)$ ($i = 1, \dots, m$) представляют собой нерегулярные (вообще говоря, индетерминированные) переменные, ограниченные по уровням $\varepsilon^{(i)}$ для всех $n \in [0, +\infty)$:

$$\sup_{0 \leq n < +\infty} \|v_n^{(i)}\| \leq \varepsilon^{(i)} < \infty, \quad i = 1, \dots, m. \quad (4)$$

Предполагается, что оценки сверху $\varepsilon^{(i)}$ фигурирующие в (4), априори известны конструктору системы.

Управление довольно широким классом технологических процессов в содержательном плане сводится к поддержанию заданных значений $y^{0(1)}, \dots, y^{0(m)}$ выходных переменных $y^{(1)}, \dots, y^{(m)}$ при наличии неконтролируемых возмущений $v^{(1)}, \dots, v^{(m)}$. Формально же сама задача построения системы управления ставится следующим образом [4, 6]. Вводится функционал типа верхнего предела

$$J = \overline{\lim}_{n \rightarrow +\infty} \|y^0 - y_n\|_2, \quad (5)$$

определяющий предельное значение точной верхней грани евклидовой нормы вектора ошибок системы

$$e_n = y^0 - y_n \quad (6)$$

для всех достаточно больших n где $y^0 = [y^{0(1)}, \dots, y^{0(m)}]^T$. Требуется в условиях неопределенности относительно параметров объекта, выраженных в форме (3), построить замкнутую систему управления, в которой формирование последо-

вательности $\{u_n\} = u_1, u_2, \dots$ векторов управляющих воздействий обеспечивая достижение такой цели:

$$J \rightarrow \inf_{\{u_n\}}. \quad (7)$$

Вообразим вначале, что передаточная матрица B в уравнении (1) невырождена, т.е.

$$\det B \neq 0, \quad (8)$$

где символ \det обозначает определитель соответствующей матрицы. Если бы эта матрица была известна, то можно было бы сразу же по методу обратного оператора построить закон управления в виде

$$u_n = u_{n-1} + Ae_n, \quad (9)$$

полагая

$$A = B^{-1}, \quad (10)$$

где B^{-1} – матрица, обратная матрице B , а e_n – вектор ошибок, определяемый выражением (6).

Известно [4], что управление объектом (1) по закону (9), (10) приводит к достижению цели (7); при этом для функционала качества (5) в силу ограничений (4) справедлива оценка

$$J = J^0 \leq \sup_{0 < n < +\infty} \|v_n - v_{n-1}\|_2 < \infty,$$

где $J^0 = \inf_{\{u_n\}} J.$

Предположим теперь, что требование (8) невырожденности матрицы B выполняется, но сама эта матрица априори неизвестна. Рассмотрим границы интервалов $[\underline{b}^{(ij)}, \bar{b}^{(ij)}]$, к которым согласно (3) принадлежат соответствующие ее элементы. Пусть выполнены условия

$$\min\{|\underline{b}^{(ii)}|, |\bar{b}^{(ii)}|\} > \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \max\{|\underline{b}^{(ij)}|, |\bar{b}^{(ij)}|\}$$

для всех $i = 1, \dots, m$, гарантирующие в силу известной в теории матриц теоремы Адамара невырожденность любых матриц $B' = \{b'^{(ij)}\}$ с элементами $b'^{(ij)} \in [\underline{b}^{(ij)}, \bar{b}^{(ij)}]$.

Определяя множество Ξ всех возможных таких матриц B' , включая матрицу $B' = B$, выберем произвольную фиксированную матрицу B_0 из этого множества и положим $A = B_0^{-1}$. Тогда закон управления (9) приобретает вид

$$u_n = u_{n-1} + B_0^{-1}e_n. \quad (11)$$

Достаточным условием асимптотической устойчивости замкнутой системы управления (1), (6), (11) (при $v_n \equiv \underbrace{[0, \dots, 0]^T}_m$) является, как известно [4], требование

$$\max_{B' \in \Xi} \|I - B'B_0^{-1}\| < 1, \quad (12)$$

налагаемое на любую матричную норму $\|\cdot\|$, где I обозначает единичную матрицу. (В терминах, принятых в современной теории управления, условие (12) уместно интерпретировать как условие робастной устойчивости этой системы.) Согласно [4] при выполнении (12) и $v_n \neq \underbrace{[0, \dots, 0]^T}_m$ оценка сверху показателя (5) определяется как

$$J \leq \frac{1}{1 - \max_{B' \in \Xi} \|I - B'B_0^{-1}\|} \sup_{0 < n < +\infty} \|v_n - v_{n-1}\| < \infty. \quad (13)$$

Наилучшая оценка сверху функционала J , минимизирующая правую часть (13) по всем возможным $B_0 \in \Xi$, приводит прямо в решению оптимизационной (минимаксной) задачи

$$B_0 = \arg \min_{B' \in \Xi} \max_{B'' \in \Xi} \|I - B'(B'')^{-1}\|. \quad (14)$$

Это позволяет рассматривать закон управления (11), в котором матрица B_0 определяется выражением (14), как закон робастно-оптимального управления.

При наличии относительно большой априорной неопределенности, когда длины интервалов $[\underline{b}^{(ij)}, \bar{b}^{(ij)}]$ сравнительно большие, условия (12) могут быть не выполнены. В этом случае в принципе не исключается, что множество Ξ будет содержать вырожденные, а, следовательно, и плохо обусловленные

матрицы B' . При такой неопределенности управление по закону (11) при

$$\det B_0 \neq 0$$

заведомо не обеспечивает робастную устойчивость замкнутой системы [6].

Предположим, что передаточная матрица B в уравнении (1), описывающем статическую модель некоторого технологического процесса, действительно или вырожденная, т.е.

$$\det B = 0, \quad (15)$$

или плохо обусловленная, т.е.

$$\text{cond } B = \|B\| \|B^{-1}\| \gg 1, \quad (16)$$

где $\text{cond } B$ обозначает так называемое в теории матриц число обусловленности.

Из результатов, полученных в работе [6], вытекает, что если бы матрица B со свойством (15) была априори известна, то в качестве закона управления целесообразно было бы принять закон

$$u_n = u_{n-1} + B^+ e_n, \quad (17)$$

в котором B^+ – так называемая обобщенная (псевдообратная) матрица, определяемая, как известно, следующим образом:

$$B^+ := \lim_{\delta \rightarrow 0} (B^T B + \delta^2 I)^{-1} B^T.$$

Закон управления (17), предложенный в [6] в рамках концепции обобщенного инвертирования, гарантирует оптимальное управление объектом (1) с вырожденной, но известной передаточной матрицей B ; при этом

$$J \leq \|I - BB\| (\|y^0\| + \varepsilon) + 2\varepsilon < \infty,$$

$$\text{где } \varepsilon = \sqrt{[\varepsilon^{(1)}]^2 + \dots + \varepsilon^{(m)}]^2}.$$

Оказывается [6], что если B – известная матрица со свойством (16) плохой обусловленности, то для

управления объектом (1) с такой передаточной матрицей желательно использовать закон

$$u_n = u_{n-1} + B_0^+ e_n, \quad (18)$$

полученный заменой B^+ в (17) на B_0^+ . Здесь B_0 – вырожденная матрица, ближайшая к B .

Разумеется, в условиях (3) неопределенности ни закон (17), ни закон (18) реализовать нельзя. В этой связи предлагается воспользоваться адаптивным подходом [7, 8]. К сожалению, стандартный прием, сводящий классическую задачу адаптивного управления к построению процедуры так называемой точечной функциональной идентификации [8] модели объекта (1), не представляется возможным: ведь до сих пор неизвестно, можно ли вообще построить алгоритм адаптации, позволяющий формировать последовательность $\{B_n^+\} = B_1^+, B_2^+, \dots$ текущих оценок неизвестной матрицы B со свойством вырожденности

$$\det B_n^+ = 0 \quad (19)$$

для всех или хотя бы для всех достаточно больших n . (Требование (19) вытекает из того, что $\det B^+ = 0$ или $\det B_0^+ = 0$.) Но даже если бы удалось реализовать подобный алгоритм, то все равно нет еще никаких оснований гарантировать устойчивость замкнутой адаптивной системы, поскольку в условиях неизмеряемых возмущений $v_n^{(1)}, \dots, v_n^{(m)}$ не утверждается, как известно [8, гл. 7], что $\lim_{n \rightarrow \infty} B_n^+ = B^+$.

Для преодоления трудностей, связанных с текущим адаптивным оцениванием неизвестной, но заведомо вырожденной матрицы B , предлагается использовать метод, предложенный в работе [9]. Идея этого метода сводится к переходу от адаптивной идентификации модели истинного объекта (1) к адаптивной идентификации модели некоторого воображаемого объекта с передаточной матрицей

$$\tilde{B} = B + \delta_0 I, \quad (20)$$

где δ_0 – число, уточняемое далее. Особенностью передаточной матрицы \tilde{B} вида (20) является то, что она непременно должна быть невырождена:

$$\det \tilde{B} \neq 0. \quad (21)$$

Чтобы составить уравнение воображаемого объекта, прибавим $\delta_0 u_{n-1}$ к обеим частям (1). Тогда с учетом (20) получим уравнение

$$\tilde{y}_n = \tilde{B}u_{n-1} + v_n, \quad (22)$$

эквивалентное уравнению истинного объекта при

$$\tilde{y}_n = y_n + \delta_0 u_{n-1}. \quad (23)$$

Именно оно как раз играет роль уравнения воображаемого объекта с тем же самым вектором управляющих воздействий u_{n-1} и тем же самым вектором v_n неизмеряемых возмущений, но другим вектором \tilde{y}_n выходных переменных, определяемым выражением (23).

Следуя [9], определим величины

$$\beta_{\min}^{(i)} := \underline{b}^{(ii)} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \max\{|\underline{b}^{(ij)}|, |\bar{b}^{(ij)}|\}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (24)$$

$$\beta_{\max}^{(i)} := \bar{b}^{(ii)} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m \max\{|\underline{b}^{(ij)}|, |\bar{b}^{(ij)}|\}, \quad i = 1, \dots, m.$$

Тогда требуемое значение δ_0 должно удовлетворять условиям

$$\begin{aligned} \delta_0 &> -\beta_{\min} \quad \text{при} \quad |\beta_{\min}| < |\beta_{\max}|, \\ \delta_0 &< -\beta_{\max} \quad \text{при} \quad |\beta_{\min}| > |\beta_{\max}|, \end{aligned} \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned} \beta_{\min} &:= \min\{\beta_{\min}^{(1)}, \dots, \beta_{\min}^{(m)}\}, \\ \beta_{\max} &:= \max\{\beta_{\max}^{(1)}, \dots, \beta_{\max}^{(m)}\}. \end{aligned} \quad (26)$$

Можно понять, что при выполнении условий (25) с учетом (24) и того факта, что $B \in \Xi$ требование (21) непременно выполняется.

Алгоритм адаптивной параметрической идентификации модели (22) воображаемого объекта определяется далее рекуррентной процедурой [9].

$$\begin{aligned} \tilde{b}_n^{(i)} &= \tilde{b}_{n-1}^{(i)} + \gamma_n f(\tilde{e}_n^{*(i)}, \varepsilon^{(i)}, \varepsilon^0) \nabla u_n \|\nabla u_n\|^{-2}, \\ i &= 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (27)$$

В этом алгоритме

$$f(e^{*(i)}, \varepsilon^{(i)}, \varepsilon^0) = \begin{cases} 0, & \text{если } |e^{*(i)}| \leq \varepsilon^0, \\ e^{*(i)} - 2\varepsilon^{(i)} \text{sign } e^{*(i)}, & \text{при } |e^{*(i)}| > \varepsilon^0, \end{cases} \quad (28)$$

– функция нечувствительности, зависящая от переменной

$$\tilde{e}_n^{*(i)} = \nabla \tilde{y}_n^{(i)} - \tilde{b}_{n-1}^{(i)T} \nabla u_n, \quad (29)$$

а также от чисел $\varepsilon^{(i)}$ и выбранного конструктором числа

$$\varepsilon^0 > 2 \max\{\varepsilon^{(1)}, \dots, \varepsilon^{(m)}\}; \quad (30)$$

γ_n – коэффициент, выбираемый из условий

$$0 < \gamma' \leq \gamma_n \leq \gamma'' < 2 \quad (31)$$

таким образом, чтобы матрица \tilde{B}_n была невырожденной для всех n ;

$$\nabla u_n := u_n - u_{n-1}, \quad (32)$$

$$\nabla \tilde{y}_n^{(i)} := \tilde{y}_n^{(i)} - \tilde{y}_{n-1}^{(i)}. \quad (33)$$

Закон адаптивного управления воображаемым объектом (22) (а, значит, и истинным объектом (1)) строится в форме

$$u_n = u_{n-1} + \tilde{B}_n^{-1} \tilde{e}_n, \quad (34)$$

подобный (17), с той существенной разницей, что вместо неизвестной B^+ фигурирует оценка \tilde{B}_n^{-1} , а вместо вектора ошибки e_n вида (6) ошибка системы управления воображаемым объектом

$$\tilde{e}_n = y^0 - \tilde{y}_n. \quad (37)$$

Структурная схема системы (1), (27)–(37), реализующая предлагаемый подход к решению задачи

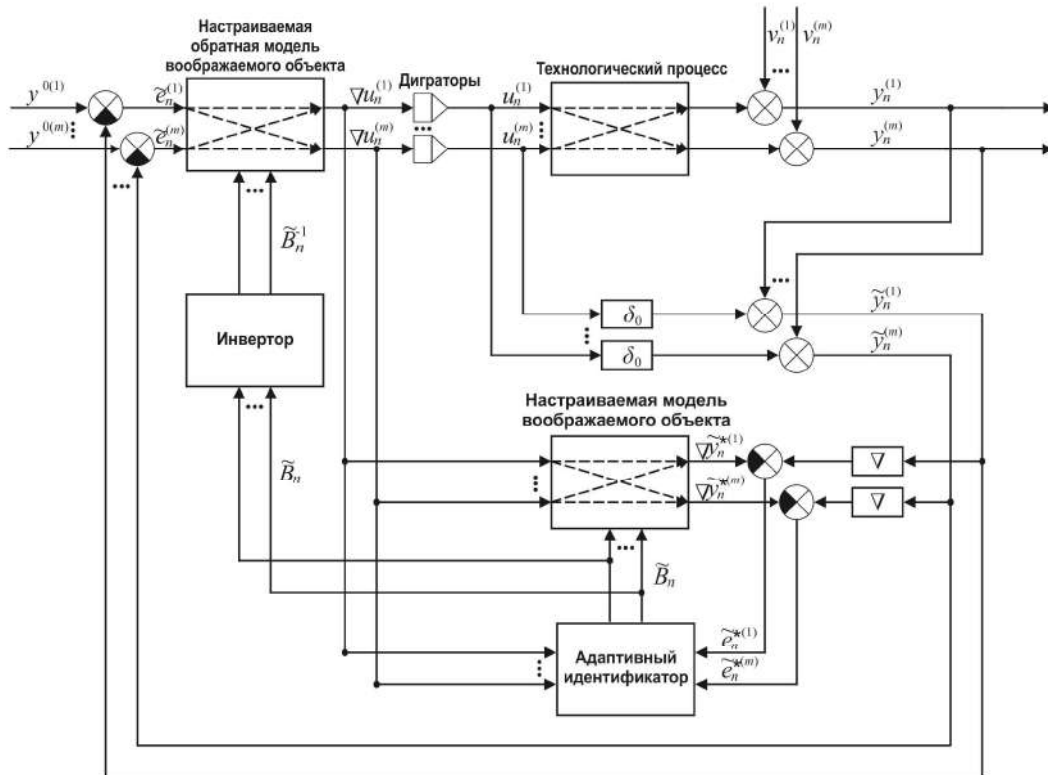


Рис. 1. Структурная схема замкнутой системы (1), (27)–(37)

адаптивного параметрического оценивания, изображена на рис. 1.

Из результатов, полученных в работе [9], следует, что управления u_n по закону (34) и выход y_n остаются ограниченными. В этой связи, предложенный закон адаптивного управления (34) можно назвать робастно-адаптивным [8]; он может быть ориентирован на управление в условиях неопределенности широким классом многосвязных технологических процессов, допускающих описание их линейной моделью вида (1).

Для проверки работоспособности и эффективности предложенного метода управления объектом (1) проводилось моделирование системы при $m = 2$ в условиях полной и неполной информации о матрице B . Чтобы приблизить условия моделирования к ре-

альным условиям, элементы матрицы B были заданы как изменяющиеся в некотором диапазоне величины с таким расчетом, что эта матрица будет оставаться плохообусловленной и даже вырожденной. Здесь $d^{(ij)}$ – псевдослучайные числа, генерируемые в диапазоне $[-0,01, 0,01]$. Компоненты вектора v_n формировались, как псевдослучайные числа $v_n^{(i)} \in [-1, 1]$. При проведении модельных экспериментов положено $y^0 = [1, 3]^T$.

Результаты моделирования неадаптивной системы управления представлены на рис. 2.

При моделировании адаптивной системы управления были заданы такие априорные оценки (3) элементов матрицы B $1 \leq b^{(11)} \leq 5$, $0 \leq b^{(12)} \leq 2$, $0 \leq b^{(21)} \leq 2$, $1 \leq b^{(22)} \leq 2$.

$$b^{(11)} = 3,95 + 0,04 \sin(0,01\pi n) + d^{(11)}, \quad b^{(12)} = 1,95 + 0,04 \sin(0,01\pi n - \pi / 2) + d^{(12)},$$

$$b^{(21)} = 1,98 + 0,01 \sin(0,01\pi n - \pi / 2) + d^{(21)}, \quad b^{(22)} = 0,97 + 0,02 \sin(0,01\pi n) + d^{(22)}$$

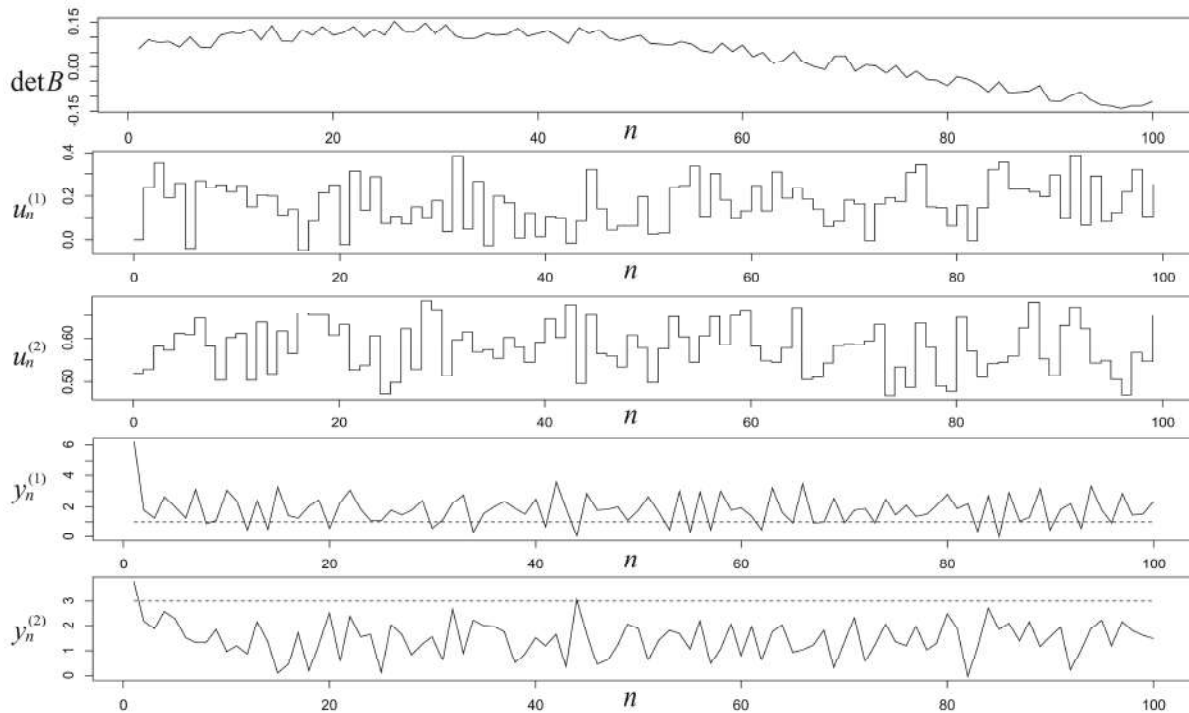


Рис. 2. Динамические процессы в системе управления (1), (6), (18)

По формулам (24)–(25) последовательно были найдены величины $\beta_{\min}^{(1)} = -1$, $\beta_{\min}^{(2)} = -1$, $\beta_{\max}^{(1)} = 7$, $\beta_{\max}^{(2)} = 4$, $\beta_{\min} = -1$, $\beta_{\max} = 7$. Поскольку в данном эксперименте так оказалось, что $\beta_{\min} < |\beta_{\max}|$, то согласно (25) должно быть $\delta_0 > 1$. Поэтому было принято $\delta_0 = 1,1$. Из условий $b^{(1)}(0) \in [1, 5]$, $b^{(12)}(0) \in [0, 2]$, $b^{(21)}(0) \in [0, 2]$, $b^{(22)}(0) \in [1, 2]$ были взяты такие оценки элементов B_n : $b^{(1)}(0) = 1$, $b^{(12)}(0) = 1$, $b^{(21)}(0) = 0$, $b^{(22)}(0) = 1,9$; при этом $\tilde{b}^{(1)}(0) = 2,1$, $\tilde{b}^{(12)}(0) = 1$, $\tilde{b}^{(21)}(0) = 0$, $\tilde{b}^{(22)}(0) = 3$.

Результаты проведенного эксперимента представлены на рис. 3.

Рисунок 3 наглядно иллюстрирует свойство ограниченности $\{u_n\}$ и $\{y_n\}$. Последний модельный эксперимент показывает эффективность и работоспособность предложенного метода управления многосвязными технологическими процессами в условиях неопределенности и предположений что передаточная матрица B уравнений этих процессов в статическом режиме может быть плохо обусловлена или даже вырождена.

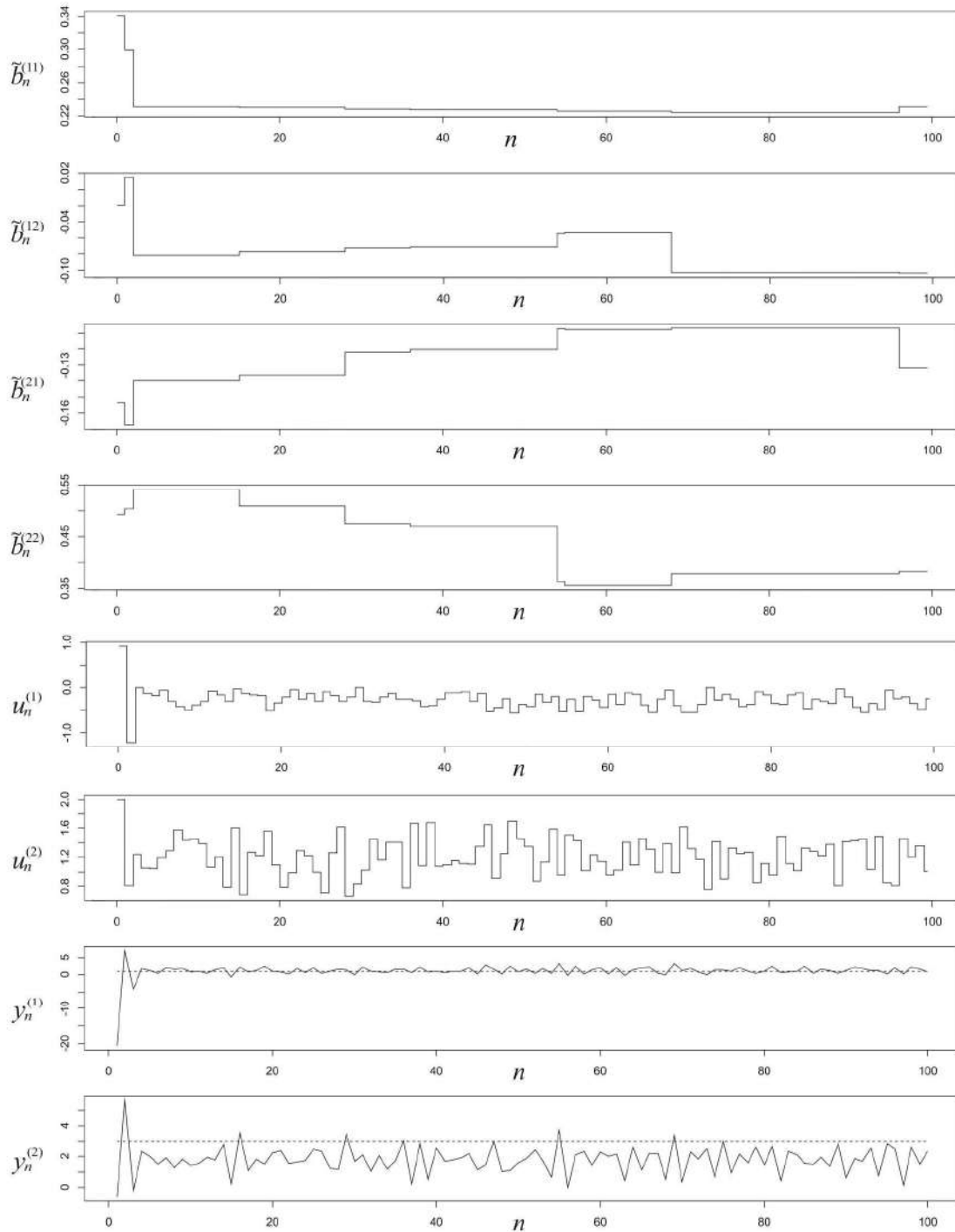


Рис. 3. Динамические процессы в системе управления (1), (27)–(37)

Список литературы

1. Lyubchik L. M. Disturbance rejection in linear discrete multivariable systems: inverse model approach. Prep. 18th IFAC World Congress (Milano, Italy, Aug. 28 – Sept. 2, 2011). Milano. 2011. P. 7921–7926.
2. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable Feedback Control. Analysis and Design. New York: Wiley, 1996. 411 p.
3. Пухов Г. Е., Жук К. Д. Синтез многосвязных систем управления по методу обратных операторов. – Киев: Наук. думка, 1966. 218 с.
4. Скурихин В. И., Проценко Н. М., Житецкий Л. С., Потапова Т.П. Об оценке допустимой неадекватности модели объекта при построении системы управления технологическим процессом по методу обратного оператора. Журнал «Электронное моделирование». 1982. – №6. – С. 11–16.
5. Skogestad S., Morari M., Doyle J. Robust control of ill-conditioned plants: High purity distillation. Journal “IEEE Trans. on Autom. Control”. 1988. – No. 12, (33). – P. 1092–1105.
6. Скурихин В. И., Житецкий Л. С., Соловчук К. Ю. Управление многосвязными объектами с вырожденными и плохо обусловленными передаточными матрицами на основе метода псевдообратного оператора. Журнал «Управляющие системы и машины». 2013. – №3. – С. 14–20, 29.
7. Goodwin G. C., Sin K. S. Adaptive Filtering, Prediction and Control. NJ.: Prentice-Hall, 1984. 540 p.
8. Азарсков В. Н., Блохин Л. Н., Житецкий Л. С., КуССуль Н. Н. Робастные методы оценивания, идентификации и адаптивного управления. Киев: изд-во НАУ, 2004. 500 с.
9. Азарсков В. Н., Житецкий Л. С., Соловчук К. Ю. Параметрическая идентификация многосвязного статического объекта в замкнутом контуре управления: специальный случай // Труды XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014). М.: ИПУ. 2014. С. 2764–2776.

АСИМПТОТИКА ПРОЦЕССОВ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В СТОХАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ: СПЕЦИАЛЬНЫЙ СЛУЧАЙ

Азарсков В.Н.,

д. т.н., зав. кафедрой СУЛА Национального
авиационного университета (Киев)
azarskov@nau.edu.ua

Житецкий Л.С.

к. т.н., проф. кафедры СУЛА Национального
авиационного университета (Киев)
leonid_zhiteckii@i.ua

Николаенко С.А.

аспирант, Международный научно-учебный центр
информационных технологий и систем (Киев)
s_nikolaenko@ukr.net

Аннотация. Изучаются асимптотические свойства стандартных градиентных алгоритмов последовательного обучения нейросетевых моделей, функционирующих в стохастической среде, для одного специального случая, когда допустима точная идентификация неизвестной нелинейности. Установлены достаточные условия сходимости этих алгоритмов.

Ключевые слова: современная теория управления, идентификация, нелинейность, градиентный алгоритм, сходимость, нейронная сеть, последовательное обучение.

ASYMPTOTICS OF SEQUENTIAL LEARNING PROCESSES FOR NEURAL NETWORKS IN STOCHASTIC ENVIRONMENT: SPECIAL CASE

V.N. Azarskov

National Aviation University (Kiev)

L.S. Zhiteckii

National Aviation University (Kiev)

S.A. Nikolaienko

Int. Research and Training Center for Inform. Technologies & Systems (Kiev)

Abstract. Asymptotical properties of the standard gradient algorithms for sequential learning in neural network models working in the stochastic environment for a special case, when the exact identification of an unknown nonlinearity is admissible, are studied. The sufficient convergence conditions of these algorithms are established. Simulation results are given.

Key words: modern control theory, identification, nonlinearity, gradient algorithm, convergence, neural network, sequential learning.

Известно, что нейронные сети являются универсальными аппроксиматорами довольно широкого класса нелинейностей. Важнейшей проблемой, которая возникает при построении нейросетевых моделей, заключается в том, как обеспечить сходимость процессов обучения таких моделей [1].

В последнее время в западной литературе появился ряд публикаций, посвященных анализу сходимости рекуррентных алгоритмов последовательного обучения многослойных нейросетей, ориентированных на функционирование в стохастической среде в режиме “on-line”. Основные результаты в этом направлении исследований представлены в работах

[2, 3]. Трудности, появляющиеся при установлении условий сходимости алгоритмов последовательного обучения нейросетевых моделей, состоят в том, как теоретически гарантировать ограниченность векторов весовых коэффициентов нейронов сети при неограниченной продолжительности самого процесса обучения [3].

Применительно к одному специальному случаю, упомянутому в [1, р.304], когда нейронная сеть содержит один скрытый слой и допускает идеально точную аппроксимацию нелинейности, в работе [4] авторами впервые был установлен один результат, касающийся асимптотических свойств стандартного градиентного алгоритма последовательного обучения с постоянным шагом. Установленные позже достаточные условия сходимости этого класса алгоритмов обучения нейросетей были включены в доклад, сделанный на 16-м симпозиуме ИФАК по системам идентификации (Брюссель, Бельгия, 2012 г.) [5] и обобщен в недавней работе [6].

Эффективным инструментом для исследования асимптотики процессов обучения на основе классической градиентной процедуры для достаточно общего случая представляется метод функции Ляпунова и ее стохастический аналог, получивший существенное развитие в работе [7], в которой установлены различные достаточные условия сходимости так называемых псевдоградиентных алгоритмов обучения нелинейно параметризуемых моделей. Иной подход к решению данной задачи, основанный на изучении квазифейеровских случайных последовательностей, можно найти в монографии [8].

Настоящая статья продолжает исследования асимптотических свойств градиентных алгоритмов обучения нейросетей, проведенное авторами в [4-6] в направлении установления условий их глобальной сходимости с вероятностью 1. В рамках этих исследований используются некоторые базовые результаты, полученные в свое время в [7, 8].

Рассматривается некоторая неизвестная нелинейная функция, описываемая уравнением

$$y = F(x). \quad (1)$$

В этом уравнении $y \in \mathbb{R}$ и $x \in \mathbb{R}^N$ – соответственно выходная скалярная переменная и вектор входных переменных, доступные для измерения в каждый n -й дискретный момент времени ($n = 1, 2, \dots$). Следуя [4, 6], будем считать, что

$$y(n) = F(x(n-1)), \quad (2)$$

где $F : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$ – неизвестное отображение.

Для аппроксимации нелинейности (1) применим двухслойную нейронную сеть, содержащую M ($M \geq 1$) нейронов в скрытом слое. Входами каждого j -го нейрона этого слоя в момент времени n являются компоненты вектора $x(n-1)$. Выходной сигнал в n -й момент времени описывается выражением

$$y_j^{(1)}(n) = \sigma \left(b_j^{(1)} + \sum_{i=1}^N w_{ij}^{(1)} x_i(n-1) \right), \quad j = 1, \dots, M. \quad (3)$$

Здесь $x_i(n-1)$ – i -й компонент вектора $x(n-1)$, а $w_{ij}^{(1)}$ и $b_j^{(1)}$ – соответственно весовые коэффициенты и смещения j -го нейрона. Функция $\sigma(\cdot)$ представляет так называемую активационную функцию [1]. В скрытом (втором) слое находится единственный нейрон, выходы которого служат входами для выходного слоя. Выходной сигнал второго слоя $y^{(2)}(n)$ в момент времени n определяется как

$$y^{(2)}(n) = \sum_{j=1}^M w_j^{(2)} y_j^{(1)}(n) + b^{(2)}, \quad (4)$$

где $w_1^{(2)}, \dots, w_M^{(2)}$ – веса этого нейрона, а $b^{(2)}$ – смещение.

Поскольку функция $\sigma(\cdot)$ естественным образом предполагается нелинейной, то из (3), (4) с учетом (2) следует, что $y^{(2)}(n)$ – нелинейная функция, зависящая от $x(n-1)$ и от $(M(N+2)+1)$ -мерного вектора параметров

$$w = [w_{11}^{(1)}, \dots, w_{N1}^{(1)}, b_1^{(1)}, \dots, w_{1M}^{(1)}, \dots, w_{NM}^{(1)}, b_M^{(1)} : w_1^{(2)}, \dots, w_M^{(2)}, b^{(2)}]^T,$$

где T обозначает знак транспонирования. Чтобы подчеркнуть этот факт, определим выходной сигнал нейронной сети в форме

$$y^{(2)}(n) = y_{NN}(w, x(n-1)), \quad (5)$$

где $y_{NN} : \mathbb{R}^N \times \mathbb{R}^{M(N+2)+1} \rightarrow \mathbb{R}$.

Введем следующее основополагающее допущение: существует, по крайней мере, один вектор $w = w^* \in \mathbb{R}^{M(N+2)+1}$ такой, что $F(x)$ может быть точно аппроксимирована функцией $y_{NN}(x, w^*)$ в смысле

$$F(x) \equiv y_{NN}(x, w^*) \quad (6)$$

для всех x из некоторого компактного множества $X \subset \mathbb{R}^N$. Именно это допущение как раз и упоминается в [1] как идеальный (специальный) случай.

Определим теперь бесконечную обучающую последовательность пар $\{(x(n-1), y(n))\}_{n=1}^{\infty}$, в которых векторы $x(n-1)$ берутся из множества X . Далее, сформулируем алгоритм обучения для коррекции оценок вектора параметров $w(n)$ как следующую стандартную градиентную процедуру:

$$w(n) = w(n-1) + \eta e(n, w(n-1)) \text{grad}_w y_{NN}(x(n-1), w(n-1)). \quad (7)$$

В этом алгоритме

$$e(n, w(n-1)) = y(n) - y_{NN}(x(n-1), w(n-1)) \quad (8)$$

– текущая ошибка оценивания, $\text{grad}_w y_{NN}(x(n-1), w(n-1))$ – градиент функции $y_{NN}(x, w)$ в точке $w = w(n-1)$, $\eta \equiv \text{const} > 0$ – шаг обучения.

Задача состоит в изучении асимптотических свойств последовательности $\{w(n)\} = w(1), w(2), \dots$ весовых векторов, порожденной рекуррентным алгоритмом (7), (8) при данном начальном $w(0)$. Более определенно, требуется установить условие сходимости этого алгоритма в специальном случае, оговоренном предположением (6).

Следуя [7], для анализа асимптотических свойств алгоритма (7), (8), т.е. его поведения при $w(n) \rightarrow \infty$ введем скалярную неотрицательную функцию $V(w)$ вида

$$V(w) = 0 \text{ при } w = w^*, V(w) > 0 \text{ при } w \neq w^*. \quad (9)$$

При наличии одноточечного множества $W^* = \{w^*\}$ функция $V(w)$ удовлетворяющая требованию (9), обычно определяется как квадрат расстояния вектора w от w^* :

$$V(w) = \|w^* - w\|^2. \quad (10)$$

Здесь и далее $\|\cdot\|$ обозначает евклидову норму вектора. Согласно [7] эта функция должна быть непрерывно дифференцируема по всем компонентам вектора w , а ее градиент удовлетворять условию

$$\|\text{grad} V(w') - \text{grad} V(w'')\| < L \|w' - w''\| \quad \forall w', w'' \in \mathbb{R}^{M(N+2)+1}, \quad (11)$$

в котором L обозначает константу Липшица; см. [7, условие B].

Оказывается, что если нейронная сеть содержит скрытый слой, то множество W^* состоит из нескольких изолированных точек w^* [5, 6]. В частности, в простейшем случае, когда имеется один нейрон в скрытом слое ($N = 1, M = 1$), а активационная функция $\sigma(\cdot)$ описывается выражением

$$\sigma(s) = \frac{1}{1 + \exp(-s)}, \quad (12)$$

то область W^* содержит две точки:

$$w^{*(1)} = [w_1^*, w_2^*, w_3^*, w_4^*]^T \text{ и}$$

$$w^{*(2)} = [-w_1^*, -w_2^*, -w_3^*, w_3^* + w_4^*]^T.$$

В случае, когда множество W^* неодноточечное, функция $V(w)$ может быть выбрана согласно [7] следующим образом:

$$V(w) = \inf_{w^* \in W^*} \|w^* - w\|^2. \quad (13)$$

Анализ выражения (13) показывает, что функция $V(w)$ вида (13) в отличие от (10), к сожалению, не обладает свойством непрерывной дифференцируемости во всех точках w из $\mathbb{R}^{M(N+2)+1}$. В частности, при $N = 1, M = 1$, когда эта функция определяется как

$$V(w) = \min\{V^{(1)}(w), V^{(2)}(w)\},$$

где

$$V^{(i)}(w) = \|w^{*(i)} - w\|^2,$$

условие (11) не выполняется на границе между двумя областями в пространстве \mathbb{R}^4 , определяемой условием $V^{(1)}(w) = V^{(2)}(w)$. Этот досадный факт демонстрирует рис. 1, на котором показаны также некоторые окрестности $W(w^{*(1)})$ и $W(w^{*(2)})$ точек $w^{*(1)}$ и $w^{*(2)}$.

$$V_n \leq V_{n-1} \quad \forall n. \quad (14)$$

Поскольку $V_n \geq 0$, то условие (14), при котором V_n не возрастает, достаточно для существования предела

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V_n = V_\infty, \quad (15)$$

где V_∞ – случайная величина, зависящая от $w(0)$ и $\{x(n)\}$. Тем не менее, условие (14) в принципе не является необходимым для существования этого предела. С другой стороны, такого предела, вообще говоря, может и не быть [4].

При моделировании алгоритма обучения (7), (8) в стохастической среде сразу же обнаружилось [4], что если нейросеть содержит скрытый слой, то требование (15) монотонного убывания V_n не выполняется даже в относительно малой окрестности $\|w^* - w(0)\|$ начального приближения $w(0)$ к w^* . Ориентируясь на

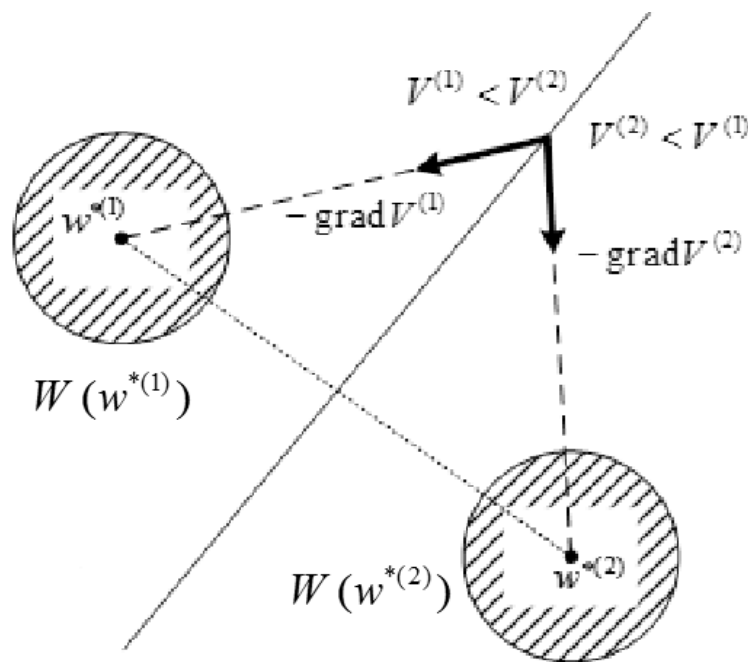


Рис. 1. Иллюстрация свойств нейронной сети с одним скрытым слоем и $N = 1$.

Переменная $V_n := V(w(n))$ немедленно становится так называемой функцией Ляпунова [5–7] для алгоритма (7), (8), если только

функционирование нейросети в этой среде, перейдем к стохастической версии требования (14) в форме

$$M \{V_n | V_{n-1}, \dots, V_0\} \leq V_{n-1}, \quad (16)$$

где символ $M\{V_n | \cdot\}$ обозначает условное математическое ожидание случайной V_n . Заметим, что случайная величина V_n , которая определяется соотношением (16), известна в теории вероятностей как супермартигал (в ранней литературе по теории вероятностей употреблялся термин «полумартигал»; см. [8, с.109]).

Пусть $W(w^{*(i)})$ обозначает некоторую окрестность вектора $w^{*(i)}$ такую, что

$$V^{(i)}(w) < V^{(j)}(w)$$

для всех $w \in W(w^{*(i)})$, $j \neq i$ (см. рис. 1). Предположим далее, что начальная оценка $w(0)$ принадлежит i -ой окрестности $W(w^{*(0)})$: $w(0) \in W(w^{*(i)})$. Повторяя практически полностью доказательство теоремы 3 в работе [5], устанавливаем, что если вдоль всей траектории движения, порожденной процедурой обучения (7), (8), выполняется соотношение

$$M_x \{e(n, w(n-1)) \text{grad}_w^T y_{NN}(w(n-1), x(n-1))(w^{*(i)} - w(n))\} \geq M_x \{e^2(n, w(n-1)) \| \text{grad}_w y_{NN}(w(n-1), x(n-1)) \|^2\}, \quad (17)$$

в котором $M_x \{\cdot\}$ – символ математического ожидания по x , а

$$0 < \eta < 1, \quad (18)$$

то выполняется соотношение (16). Поскольку же $V_n \geq 0 \forall n$, то это означает, что при выполнении (17) случайная величина V_n – положительный супермартигал. По известной теореме Дуба о сходимости мартигалов [9, п.29.3] при $n \rightarrow \infty$ почти наверное (п.н.) существует некоторый конечный предел $V_\infty^{(i)}$:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} V_n^{(i)} = V_\infty^{(i)} < \infty \quad \text{п.н.} \quad (19)$$

Если теперь ввести совершенно не ограничительное предположение, что $p(x) \neq 0$ на X (за исключением быть может некоторых векторов $x \in X$, то по известной в теории вероятностей лемме

Бореля-Кантелли [9, с.242] в соотношении (19) имеем $V_\infty^{(i)} = 0$ (п.н.), откуда

$$\lim_{n \rightarrow \infty} w(n) = w^{*(i)} \quad \text{п.н.} \quad (20)$$

К сожалению, соотношение (17) представляется неконструктивным: его нельзя проверить до проведения самого обучения. Кроме того (и это не менее существенно), фигурирующий в (17) вектор $w^{*(i)}$ априори неизвестен. Между тем такую проверку можно было бы заменить проверкой другого соотношения

$$\begin{aligned} & \int_X (y_{NN}(w', x) - y_{NN}(w'', x)) \text{grad}_w^T y_{NN}(w'', x)(w' - w'') p(x) dx \geq \\ & \geq \int_X [y_{NN}(w', x) - y_{NN}(w'', x)]^2 \| \text{grad}_w y_{NN}(w'', x) \|^2 p(x) dx, \end{aligned} \quad (21)$$

$w', w'' \in \mathbb{R}^{M(N+2)+1}$,

приведенного в работе [6]. Но такая проверка требует, вообще говоря, перебора различных возможных векторов w', w'' на $\mathbb{R}^{M(N+2)+1}$. К тому же само по себе соотношение определяет только условие, необходимое для выполнения (17).

Проведенные модельные эксперименты показали, что если начальная оценка $w(0)$ находится слишком далеко от множества W^* то условие (17) не выполняется. Поэтому требование (17) вместе с требованием (18) правомерно интерпретировать как условие локальной сходимости алгоритма обучения (7), (8) с вероятностью 1.

Оказывается, что при больших начальных значениях $\| w^{*(i)} - w(0) \|$ выполняется не условие (17), приводящее к (16), а другое более жесткое условие вида

$$M \{V_n | V_{n-1}, \dots, V_0\} \leq V_{n-1} + \chi_n, \quad (22)$$

в котором функция V_n определяется выражением (13), а переменная $\chi_n \geq 0$ обладает свойством

$$\sum_{n=1}^{\infty} P \{ \chi_n > 0 \} < \infty, \quad \text{п.н.} \quad (23)$$

где $P \{\cdot\}$ обозначает вероятность случайного события, заключенного в фигурных скобках.

На основании упомянутой ранее леммы Бореля-Кантелли можно заключить, что при выполнении (23) с вероятностью 1 существует некоторый случайный момент $n = n^* < \infty$ такой, что

$$\chi_n = 0 \quad \forall n \geq n^*.$$

Поэтому

$$\sum_{n=1}^{\infty} M\{\chi_n\} < \infty \quad \text{п.н.} \quad (24)$$

Согласно [8, гл. 3, теорема 3] в условиях (22), (24) справедливо такое асимптотическое свойство алгоритма обучения (7), (8):

$$V_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} V_{\infty} \quad \text{п.н.} \quad (25)$$

Эти условия в силу (25) как раз и являются достаточными условиями глобальной сходимости алгоритма обучения (7), (8) с вероятностью 1.

Для проверки условий сходимости данного алгоритма и демонстрации его поведения в асимптотике проводилось моделирование процесса обучения нейросети при малых и больших расстояниях начальных векторов $w(0)$ от множества W^* , определяемых начальными значениями функции Ляпунова

$$V_0 = V(w(0)) = \min\{\|w^{*(1)} - w(0)\|, \|w^{*(2)} - w(0)\|\}.$$

В качестве нелинейности (1) была взята функция

$$y = \frac{3,75 + 0,05 \exp(-7,15x)}{1 + 0,19 \exp(-7,15x)}.$$

Эта нелинейная функция может быть безошибочно аппроксимирована двухслойной нейронной сетью, описываемой уравнениями (3), (4), (12) с векторами весов $w^{*(1)} = [7,15, 1,65, 3,45, 0,3]^T$ и $w^{*(2)} = [-7,15, -1,65, -3,45, 3,75]^T$.

Во всех экспериментах шаг η согласно (18) был взят равным $\eta = 0,01$. Последовательность $\{x(n)\}$ генерировалась как последовательность независимых

равномерно распределенных псевдослучайных чисел в диапазоне $X = [-1,0, 1,0]$. Продолжительность процесса обучения не превышала 40 000 шагов.

Результаты одного из проведенных модельных экспериментов при малом V_0 (эксперимент №1) представлены на рис. 2. В этом эксперименте начальные оценки были выбраны такими: $w_{11}^{(1)}(0) = 1,4$, $b_1^{(1)}(0) = -0,1$, $w_1^{(2)}(0) = -0,56$, $b^{(2)}(0) = 0,46$.

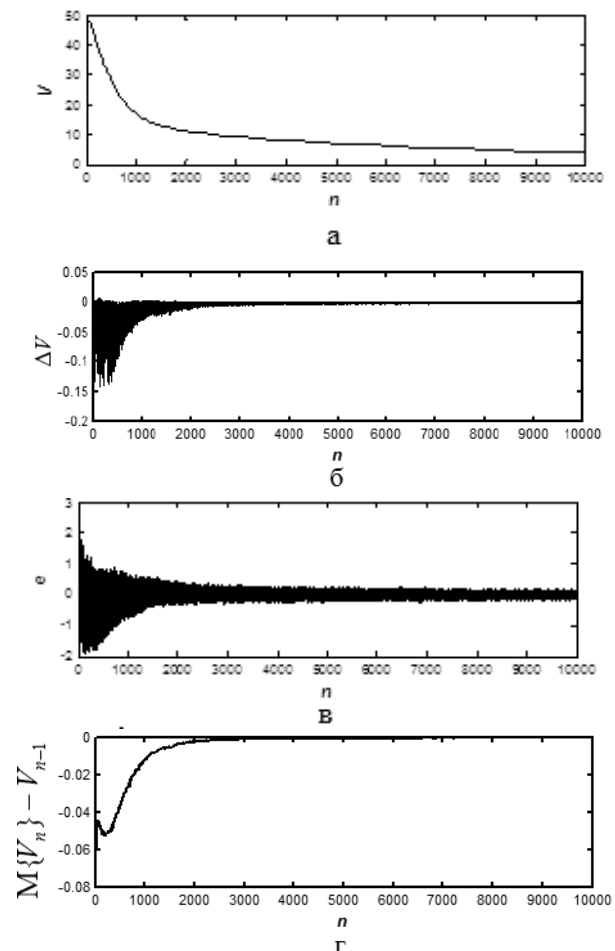


Рис. 2. Процесс обучения нейросети в эксперименте №1: а – функция V_n ; б – первая разность ΔV_n ; в – ошибка оценивания $e(n)$; г – разность между условным математическим ожиданием $M\{V_n | \cdot\}$ и предыдущим значением V_{n-1} .

Из рис. 2,а видно, что функция V_n немонотонно уменьшается: ее первая разность $\Delta V_n = V_n - V_{n-1}$ изменяет свой знак (см. рис. 2,б). Тем не менее $e(n) \rightarrow 0$ с ростом n , как показывает рис. 2,в. Эта замечательная особенность процесса обучения следует из того

факта, что удовлетворяется условие (16) локальной сходимости алгоритма. Рис. 2,г, на котором условное математическое ожидание $M\{V_n | \cdot\}$ было оценено численно, демонстрирует указанную особенность.

Во второй серии модельных экспериментов начальные оценки $w(0)$ выбирались на сравнительно больших расстояниях от W^* . На рис. 3 представлены результаты моделирования алгоритма обучения, полученные при проведении одного эксперимента в этой серии (эксперимент №2). В этом эксперименте были приняты такие начальные значения компонентов вектора $w(0)$: $w_1^{(1)}(0) = 0,53$, $b_1^{(1)}(0) = -0,5$, $w_1^{(2)}(0) = -0,92$, $b^{(2)}(0) = 1,4$.

Как показывает рис. 3,а, в процессе обучения вектор $w(n)$, начиная свое движение в области $W(w^{*(1)})$, сначала переходит в область $W(w^{*(2)})$, а затем снова возвращается в область $W(w^{*(1)})$. При этом наблюдается заметное немонотонное изменение функции V_n (см. рис. 3,б и в) и наглядно иллюстрируется выполнение условий (22), (23) (см. рис. 3,г и д). Из рис. 3,е видно, что в процессе обучения текущий средний квадрат ошибки

$$e_{cp}^2(n, w(n-1)) := M_x \{e^2(n, w(n-1))\}$$

стремится к 0 по мере роста n , как и должно быть при $\gamma \in (0, 1)$.

Проведенные модельные эксперименты подтвердили, что при выполнении условий (22), (23) совместно с (18) обеспечивается глобальная сходимость алгоритма обучения (7), (8) нейросети на почти всех обучающих последовательностях $\{(x(n-1), y(n))\}_{n=1}^{\infty}$.

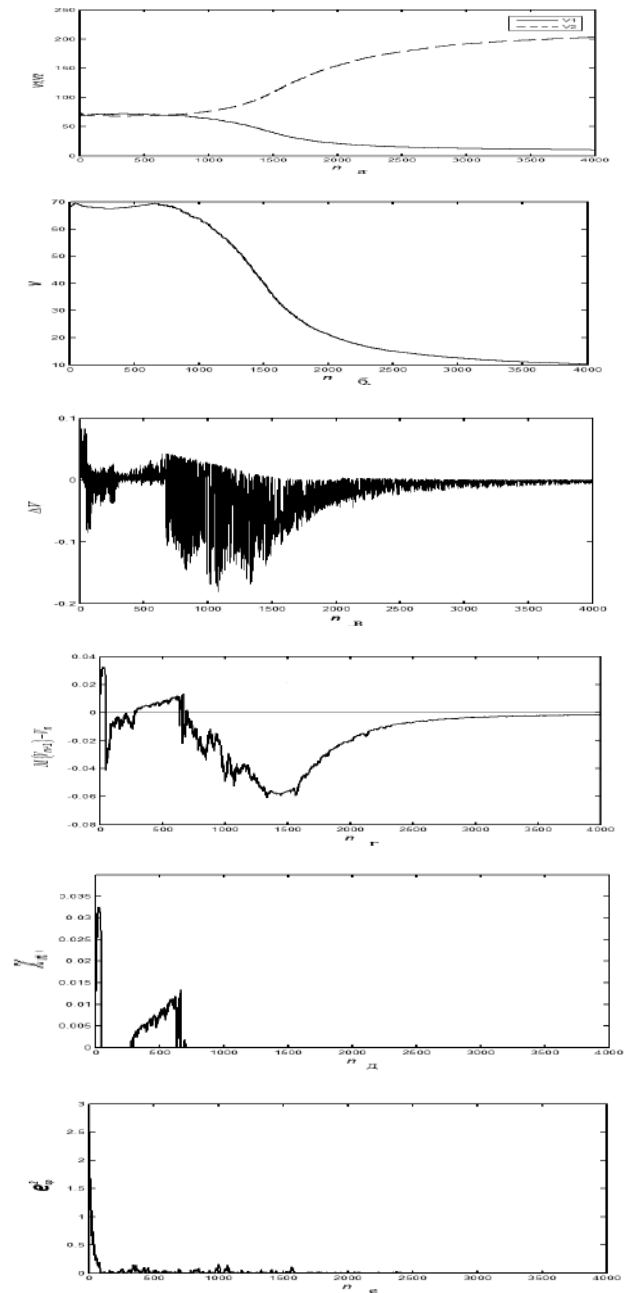


Рис. 3. Процесс обучения нейросети в эксперименте №2:

а – функции V_1, V_2 ; б – функция V_n ; в – первая разность ΔV_n ; г – разность между условным математическим ожиданием $M\{V_n | \cdot\}$ и предыдущим значением V_{n-1} ; д – переменная χ_n ; е – средний квадрат $e_{cp}^2(n, w(n-1))$ текущей ошибки оценивания.

Список литературы

1. Tsyppkin Ya. Z., Mason J. D., Avedyan E. D., Warwick K., Levin I. K. Neural networks for identification of nonlinear systems under random piecewise polynomial disturbances. Journal "IEEE Trans. on Neural Networks". 1999. No 2(10). P. 303–311.
2. Gaivoronski A. A. Convergence properties of backpropagation for neural nets via theory of stochastic gradient methods. Journal "Optim. Methods Software". 1994. V. 4. P. 117–134.
3. Zhang H., Wu W., Liu F., Yao M. Boundedness and convergence of online gradient method with penalty for feedforward neural networks. Journal "IEEE Trans. Neural Networks". 2009. No 6(20). P. 1050–1054.
4. Азарсков В.Н., Житецкий Л.С., Николаенко С.А. Достаточные условия сходимости градиентных алгоритмов последовательного обучения нейросетей: стохастический случай. Сборник научных трудов 14-й Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика-2012» (Москва, 2012). 2012. Ч. 1. с. 44 – 54.
5. Zhiteckii L. S., Azarskov V. N., Nikolaienko S. A. Convergence of learning algorithms in neural networks for adaptive identification of nonlinearly parameterized systems. Proc. 16th IFAC Symposium on System Identification (Brussels, Belgium, July 10 – 13, 2012). 2012. P. 1593–1598.
6. Azarskov V. N., Zhiteckii L. S., Nikolaienko S. A. Sequential learning processes in neural networks applied as models of nonlinear systems. Journal "Electronics and Control Systems". 2013. No 3(37). P. 124 – 132.
7. Поляк Б.Т. Сходимость и скорость сходимости итеративных стохастических алгоритмов. I. Общий случай. Журнал «Автоматика и телемеханика». 1976. №12. с. 83–94.
8. Ермольев Ю.М. Методы стохастического программирования. М.: Наука. 1976. 239с.
9. Лоэв М. Теория вероятностей. М.: изд-во иностр. лит. 1962. 719с.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

Плетнев Л.В.,

д.ф.-м.н., завкафедрой «Высшая математика»

Данилович Л.А.,

к.ф.-м.н., доцент кафедры «Высшая математика»

Концевой М.Г.,

студент

Самосадов А.А.,

студент

Белорусско-Российский университет (г. Могилев, Республика Беларусь)

pletnev@tut.by

Аннотация. *Исследованы свойства определителей третьего порядка с помощью компьютерного эксперимента. Получены закономерности распределений определителей, составленных из цифр, в зависимости от величины определителей и числовые характеристики данных распределений. Установлены новые закономерности и свойства определителей.*

Ключевые слова: *определитель, распределение.*

STATISTICAL RESEARCH OF THE THIRD RANGE DETERMINANTES

L. Pletnev, L. Danilovich, M. Kantsavy, A. Samasadau

Belarus-Russia University (Mogilev, RB)

Abstract. *The properties of the third order determinants have been searched by means of computer experiment. Regularities of distributions of the determinants, composed of figures, depending on the size of determinants and numerical characteristics of these distributions have been received. New regularities and properties of determinants have been determined.*

Key words: *determinant, distribution.*

Для изучения высшей математики студентам могут потребоваться такие разделы, которые они будут изучать через год. Возникает задача интенсификации самостоятельного изучения студентами других разделов математики. В результате решения таких задач, студенты, с синергетической точки зрения, начинают более глубоко понимать взаимосвязь различных разделов математики.

Определители являются одними из простейших структур в математике. Идея введения определителей принадлежит Лейбницу, который опубликовал первое исследование, посвященное определителям в 1678 г. [1]. Дальнейшие исследования свойств определителей и матриц связаны с именами Крамера, Вандермонда, Гаусса, Коши, Бине, Кэли, Сильвестра, Кронекера, Вейерштрасса. Широко определители используются в современной математике и физике.

1. Определители с повторяющимися цифрами

В качестве одной из задач, связанных с вычислением определителей, студентам была предложена задача о вычислении определителя третьего порядка [2,3]. Общее количество определителей третьего порядка, составленных из цифр, которые могли быть все разными – $N = 9^9 = 387420489$. Очевидно, что некоторые определители равны нулю ($s = 0$). Однако определить общее число определителей равных нулю аналитически невозможно. Решение этой задачи было получено с помощью компьютерного эксперимента. Таких определителей оказалось 5902335 или 1,5235%.

Анализ результатов расчетов показал, что величины максимальных определителей оказались равными 1216, а величины минимальных определителей –1216. Максимальных определителей оказалось три

$$\begin{vmatrix} 1 & 9 & 9 \\ 9 & 1 & 9 \\ 9 & 9 & 1 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 9 & 1 & 9 \\ 9 & 9 & 1 \\ 1 & 9 & 9 \end{vmatrix} \quad \begin{vmatrix} 9 & 9 & 1 \\ 1 & 9 & 9 \\ 9 & 1 & 9 \end{vmatrix}$$

Минимальные определители получаются из этих определителей с помощью элементарных преобразований. Положительных и отрицательных определителей оказалось равное количество – по 190759077. Дополнительный визуальный анализ полученных данных показал симметрию полученного распределения относительно $s = 0$.

Анализ распределения определителей по величине показал, что от минимального до максимального значения определители для некоторых значений s не существуют. На рис. 1 приведен полигон частот величин определителей, анализ которого показывает, что частоты определителей не монотонно возрастают и убывают. Распределение имеет сложный вид.

лучены следующие значения: среднее арифметическое $\bar{S} = 0$, среднее квадратическое отклонение равно $\sigma = 147,571$, асимметрия $A_s = 0$ и эксцесс $E_k = 0,26606$.

2. Определители с различными цифрами.

С помощью комбинаторики, используя перестановки из 9 элементов (различных цифр), можно подсчитать число всех возможных определителей третьего порядка $N = 9! = 362880$. Эта задача была решена с помощью нового компьютерного эксперимента. Определителей равных нулю оказалось 2736 (0,75397%). Величины максимальных определителей оказались равными 412, а величины минимальных определителей – 412. Таких определителей оказалось по 36. В таблице 2 приведены сгруппированные по 6 максимальные определители, полученные в точных расчетах.

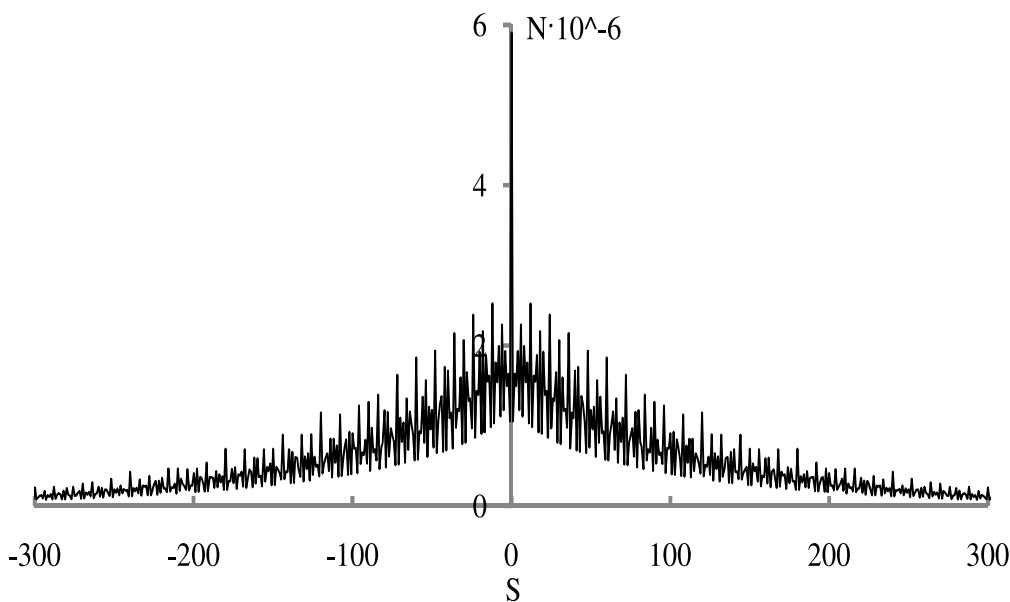


Рис. 1. Полигон частот для величин определителей s .

На рис. 2 представлена нормированная гистограмма частот определителей. Была проведена статистическая обработка полученных данных по формулам для начальных и центральных моментов [4]. Для данного распределения были по-

Положительных и отрицательных определителей оказалось по 180072. Дополнительный визуальный анализ полученных данных показал симметрию полученного распределения относительно $s = 0$.

Таблица 1

Некоторые максимальные определители

1	4	8	5	9	3	7	2	6	3	9	5	8	4	1	6	2	7	2	6	7	4	8	1	9	3	5
7	2	6	1	4	8	5	9	3	6	2	7	3	9	5	8	4	1	9	3	5	2	6	7	4	8	1
5	9	3	7	2	6	1	4	8	8	4	1	6	2	7	3	9	5	4	8	1	9	3	5	2	6	7

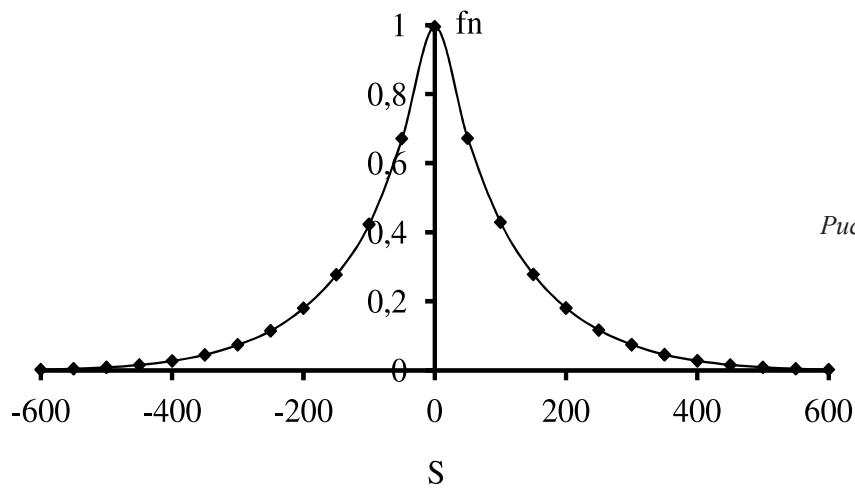


Рис. 2. Нормированные гистограммы частот величин определителей S

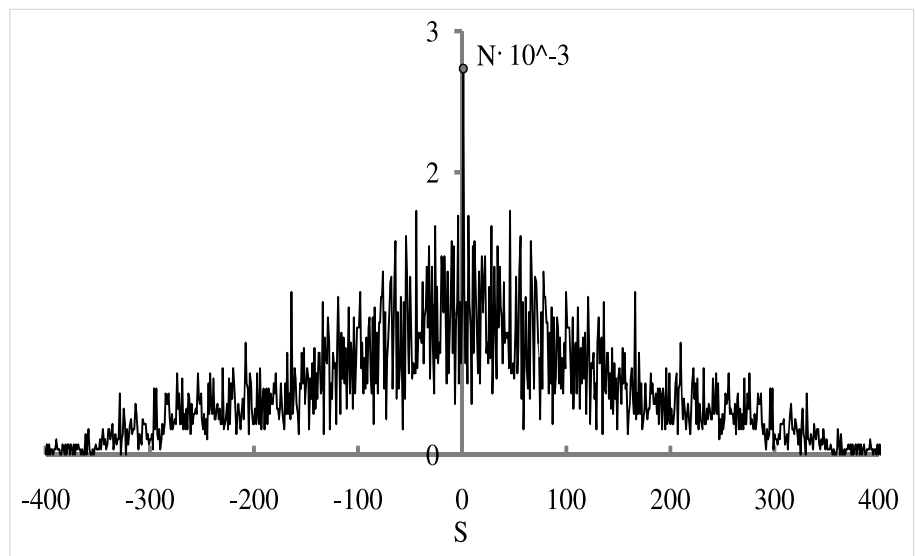


Рис. 3. Полигон частот величин определителей

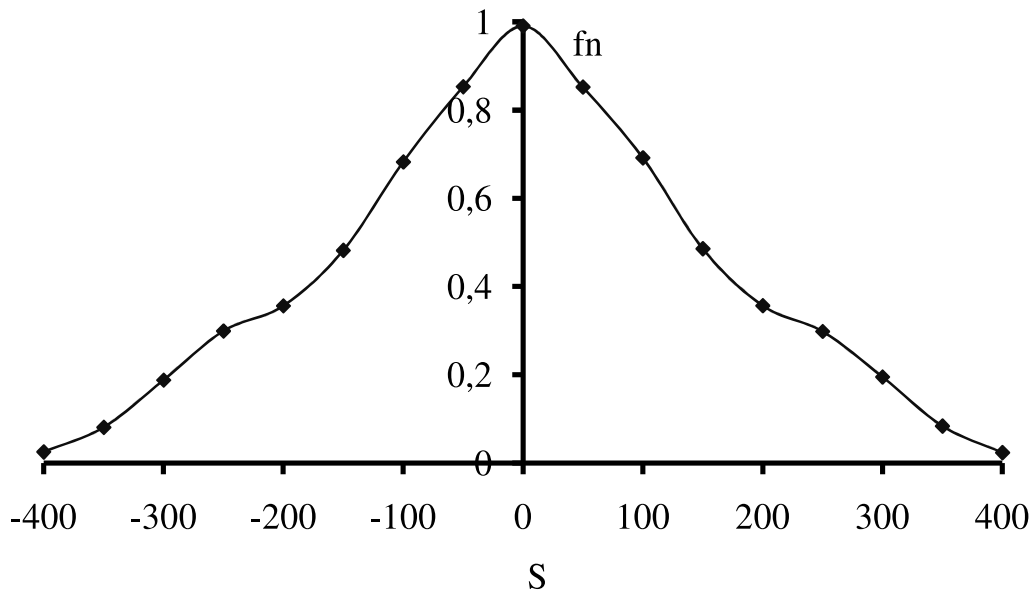


Рис. 4. Нормированная гистограмма частот для величин определителей.

Также как и в предыдущем случае в распределении определителей некоторые определители отсутствуют. Полигон частот определителей по величине представлен на рис. 3.

Вид данного полигона частот похож на полигон частот, полученных для случая с повторяющимися цифрами.

Нормированная гистограмма частот приведена на рис. 4. Для этого распределения были получены следующие числовые характеристики: среднее арифметическое $\bar{S} = 0$, среднее квадратическое отклонение равно $\sigma = 154,8537$, асимметрия $A_s = 0$ и эксцесс $E_k = 0,274856$.

3. Дополнительные свойства определителей

Проблема отыскания определителей с максимальными и минимальными значениями может быть решена другим способом. Можно считать величину определителя как функцию от 9 независимых переменных a_{ij} . Найдя частные производные от функции S по этим переменным, и приравняв их нулю, получим 9 алгебраических уравнений. Решение этой системы уравнений приводит к системе 3-х уравнений, зависящих от 6 независимых переменных.

Анализ этих производных позволил установить новую закономерность, связывающую частную производную от определителя по независимой переменной a_{ij} (элементу определителя) с алгебраическим дополнением

$$\frac{\partial S}{\partial a_{ij}} = A_{ij}, \tag{1}$$

Эта закономерность справедлива для определителей любых порядков. Доказательство этой закономерности основывается на разложении определителя по i строке или j столбцу. Данный элемент входит в разложение только один раз и умножается на алгебраическое дополнение, которое не зависит от этого элемента.

Анализ максимальных определителей, приведенных в таблице 2, позволил установить еще одну закономерность. Если определитель повернуть на 90° в положительном или отрицательном направлении, то знак определителя изменится на противоположный

$$\Delta = -\Delta'. \tag{2}$$

Если такой определитель повернуть еще на 90° , то знак определителя изменится на противоположный, т.е. станет таким, какой был у исходного определителя. Величина такого определителя будет равна величине исходного определителя. Это свойство справедливо для определителей любых порядков с любыми элементами. Доказательство не представляет особых трудностей и начинается с определителей второго порядка.

Статистическая обработка определителей третьего порядка, выполненная с помощью компьютерного эксперимента, позволило получить новую уникальную информацию и закономерности, которые невозможно получить при традиционном подходе. Установлены новые закономерности, связанные с распределением определителей по величине. Полученные результаты можно использовать в криптографии.

Список литературы

1. Александрова, Н.В. Математические термины / Н.В. Александрова – М.: Высшая школа, 1978. – 190 с.
2. Гусак, А. А. Справочник по высшей математике / А.А. Гусак – Мн.: Наука и техника, 2003. – 480 с.
3. Блох, Э.Л. Основы линейной алгебры и некоторые ее приложения / Э.Л. Блох, Л.И. Лопшинский, В.Я. Турин. – М.: Высшая школа, 1971. – 256 с.
4. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман – М.: Высшая школа, 1977. – 480 с.

ИТЕРАЦИОННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ СИСТЕМ МАТРИЧНЫХ УРАВНЕНИЙ

Емельянова Т.В.,

кандидат технических наук, доцент

Кольчатов А.М.,

кандидат технических наук, доцент

Арзамасский политехнический институт (филиал) Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (Арзамас)

emelyanova@apingtu.edu.ru

Аннотация. В данной статье рассмотрен итерационный метод решения системы матричных уравнений. Данный метод позволяет находить более точные решения. Разработан алгоритм, который реализован в системе компьютерной математики MATLAB. Исследована проблема сходимости алгоритма.

Ключевые слова: система матричных уравнений, итерационный методы, множитель сходимости, система MATLAB.

ITERATIVE METHOD FOR SOLVING SYSTEMS OF MATRIX EQUATIONS

T. Emelyanova, A. Kolchatov

Arzamas Polytechnic Institute (branch) of Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseyev (Arzamas)

Abstract. This article discusses the iterative method for solving the systems of matrix equations. This method allows you to find more accurate solutions. The algorithm, which is implemented in a computer mathematics MATLAB. The problem of convergence of the algorithm.

Key words: system of matrix equations, iterative methods, convergence factor, system MATLAB.

Матричные уравнения широко применяются в различных областях знания – в математике, физике, информатике, экономике и др. Например, матрицы используются для решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений, нахождения значений физических величин в квантовой теории, шифрования сообщений в Интернете [2].

Существует большое число итерационных методов для решения матричных уравнений, например, такие как методы Якоби и Гаусса-Зейделя [1].

В данной работе рассмотрены итерационный метод решения систем матричных уравнений, предложенный Ф.Дингом и Т.Ченом [3]. Полученные рекурсивные формулы, были реализованы в системе MATLAB.

Рассмотрим систему матричных уравнений вида:

$$\begin{cases} A_{11}X_1B_{11} + A_{12}X_2B_{12} + \dots + A_{1p}X_pB_{1p} = C_1 \\ A_{21}X_1B_{21} + A_{22}X_2B_{22} + \dots + A_{2p}X_pB_{2p} = C_2 \\ \vdots \\ A_{v1}X_1B_{v1} + A_{v2}X_2B_{v2} + \dots + A_{vp}X_pB_{vp} = C_v \end{cases} \quad (1)$$

где $A_{ij} \in R^{m \times m}$, $B_{ij} \in R^{n \times n}$, $C_i \in R^{m \times n}$ – постоянные матрицы; $X_j \in R^{m \times n}$ – неизвестные матрицы.

Пусть

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_p \end{bmatrix} \in R^{(mp) \times n}, Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_p \end{bmatrix} \in R^{(np) \times m},$$

$$X_i, Y_i^T \in R^{m \times n},$$

$$S_A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1p} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{p1} & A_{p1} & \dots & A_{pp} \end{bmatrix}, S_B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & \dots & B_{1p} \\ B_{21} & B_{22} & \dots & B_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{p1} & B_{p2} & \dots & B_{pp} \end{bmatrix},$$

$$S_{B^T} = \begin{bmatrix} B_{11}^T & B_{12}^T & \dots & B_{1p}^T \\ B_{21}^T & B_{22}^T & \dots & B_{2p}^T \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{p1}^T & B_{p2}^T & \dots & B_{pp}^T \end{bmatrix},$$

$$S_p = \begin{bmatrix} B_{11}^T \otimes A_{11} & B_{12}^T \otimes A_{12} & \dots & B_{1p}^T \otimes A_{1p} \\ B_{21}^T \otimes A_{21} & B_{22}^T \otimes A_{22} & \dots & B_{2p}^T \otimes A_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ B_{p1}^T \otimes A_{p1} & B_{p2}^T \otimes A_{p2} & \dots & B_{pp}^T \otimes A_{pp} \end{bmatrix}.$$

Итерационные решения можно выразить кратко с использованием поэлементного произведения блочных матриц – звездочного произведения [3]:

$$X * Y = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_p \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 Y_1 \\ X_2 Y_2 \\ \vdots \\ X_p Y_p \end{bmatrix},$$

$$X * S_B = \begin{bmatrix} X_1 B_{11} & X_1 B_{12} & \dots & X_1 B_{1p} \\ X_2 B_{21} & X_2 B_{22} & \dots & X_2 B_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_p B_{p1} & X_p B_{p2} & \dots & X_p B_{pp} \end{bmatrix}.$$

В этих выражениях предполагается, что размерности матриц согласованы. Звездочное произведение Кронекера блочных матриц, обозначаемое (*), определяется так [3]:

$$S_{B^T} (*) S_A = S_p.$$

Свойства звездочного произведения описаны в работе [3].

Лемма. Система уравнений (1) имеет единственное решение X_i тогда и только тогда, когда матрица S_p невырожденная [3]:

$$\text{col}[X_1, X_2, \dots, X_p] = S_p^{-1} \text{col}[C_1, C_2, \dots, C_p].$$

Если $C_i=0$ ($i=1,2,\dots,p$), то соответствующая система однородных уравнений (1) имеет единственное решение X_i ($i=1,2,\dots,p$).

Итерационное решение для системы матричных уравнений (1) получается обобщением итерационного решения для системы уравнений Сильвестра [3]. Для этого сначала рассмотрим систему уравнений Сильвестра в более общей форме:

$$\begin{cases} AXI_B + I_A YB = C, \\ DXI_E + I_D YE = F, \end{cases}$$

его итерационное решение может быть выражено так [3]:

$$X(k) = X(k-1) + \mu \begin{bmatrix} A \\ D \end{bmatrix}^T \left\{ \begin{bmatrix} C - AX(k-1)I_B - I_A Y(k-1)B \\ F - DX(k-1)I_E - I_D Y(k-1)E \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_B & I_E \end{bmatrix}^T \right\}, \quad (2)$$

$$Y(k) = Y(k-1) + \mu \begin{bmatrix} I_A \\ I_D \end{bmatrix}^T \left\{ \begin{bmatrix} C - AX(k-1)I_B - I_D Y(k-1)B \\ F - DX(k-1)I_E - I_D Y(k-1)E \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B & E \end{bmatrix}^T \right\}, \quad (3)$$

где I_A, I_B, I_D и I_E – единичные матрицы соответствующих размерностей.

Пусть $X_i(k)$ – итерационные решения X_i . Для системы (1) предлагаем следующий итерационный алгоритм для вычисления решений X_i ($i=1,2,\dots,p$):

$$X_i(k) = X_i(k-1) + \mu \begin{bmatrix} A_{1i} \\ A_{2i} \\ \vdots \\ A_{pi} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_1 - \sum_{j=1}^p A_{1j} X_j(k-1) B_{1j} \\ C_2 - \sum_{j=1}^p A_{2j} X_j(k-1) B_{2j} \\ \vdots \\ C_p - \sum_{j=1}^p A_{pj} X_j(k-1) B_{pj} \end{bmatrix} \times [B_{1i}, B_{2i}, \dots, B_{pi}]^T \quad (4)$$

$$0 < \mu < 2 \left(\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \|A_{ij} B_{ij}\|^2 \right)^{-1} =: \mu_0. \quad (5)$$

Теорема. Если система матричных уравнений (1) имеет единственное решение $X_i, i=1,2,\dots,p$, тогда итерационное решение $X_i(k)$, определенное алгоритмом (4)-(5), сходится к решению X_i при любом начальном значении [3]:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} X_i(k) = X_i, \quad i = 1, 2, \dots, p.$$

Пусть

$$X(k) = \begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \\ \vdots \\ X_p(k) \end{bmatrix} \in R^{(mp) \times n}, C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_p \end{bmatrix} \in R^{(mp) \times n}.$$

Тогда (1) может быть выражено так [3]:

$$S_A * X * S_B I_{np \times n} = C.$$

Используя свойства звездочного произведения, выражение (4) можно представить в следующей форме:

$$X(k) = X(k-1) + \mu S_A^T \begin{bmatrix} C_1 - \sum_{j=1}^p A_{1j} X_j(k-1) B_{1j} \\ C_2 - \sum_{j=1}^p A_{2j} X_j(k-1) B_{2j} \\ \vdots \\ C_p - \sum_{j=1}^p A_{pj} X_j(k-1) B_{pj} \end{bmatrix} * S_B^T = \\ = X(k-1) + \mu S_A^T [C - S_A * X(k-1) * S_B I_{np \times n}] * S_B^T \quad (6)$$

Множитель сходимости в алгоритме (4) или (6) может быть выбран из следующего условия:

$$0 < \mu < 2 \left\{ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \lambda_{\max} [A_{ij} A_{ij}^T] \lambda_{\max} [B_{ij} B_{ij}^T] \right\}^{-1}.$$

Для рассмотренного итерационного метода был разработан алгоритм решения системы матричных уравнений.

Вводим исходные данные матрицы A, B, C.

Формируем матрицу S_p . Далее необходимо проверить условие невырожденности матрицы S_p .

Выбираем шаг вычисления итераций по формуле (5). Вычисляем значения X_i по формуле (6) до тех пор, пока итерационная ошибка, вычисляемая по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{\|X(k) - X\|^2 + \|Y(k) - Y\|^2}{\|X\|^2 + \|Y\|^2}}$$

не будет меньше заданной погрешности метода.

Используя теорему, находим решение системы X_p, Y_i .

Исследуем зависимость сходимости метода от множителя сходимости μ .

Данный алгоритм был реализован в системе компьютерной математики MATLAB.

Рассмотрим пример, иллюстрирующий работу описанного алгоритма. Пусть дана следующая система матричных уравнений:

$$A_{11} X_1 B_{11} + A_{12} X_2 B_{12} = C_1, \\ A_{21} X_1 B_{21} + A_{22} X_2 B_{22} = C_2,$$

где

$$A_{11} = \begin{bmatrix} 3.00 & -2.00 \\ -1.00 & 1.00 \end{bmatrix}, A_{12} = \begin{bmatrix} 2.00 & 1.00 \\ 1.00 & -2.00 \end{bmatrix}, A_{21} = \begin{bmatrix} 1.00 & 2.00 \\ 1.50 & -1.00 \end{bmatrix}, A_{22} = \begin{bmatrix} 1.00 & -2.00 \\ 2.00 & -1.00 \end{bmatrix},$$

$$B_{11} = \begin{bmatrix} 1.00 & 1.00 \\ -1.00 & -2.00 \end{bmatrix}, B_{12} = \begin{bmatrix} 1.00 & -2.00 \\ -1.00 & 2.00 \end{bmatrix}, B_{21} = \begin{bmatrix} 2.00 & -1.00 \\ 1.00 & 2.00 \end{bmatrix}, B_{22} = \begin{bmatrix} 1.00 & -1.00 \\ -2.00 & 1.00 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1.30 & -3.60 \\ -2.10 & -1.30 \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} 17.40 & 24.10 \\ 12.55 & 2.20 \end{bmatrix}.$$

В качестве начальных значений возьмем $X(0) = Y(0) = 10^{-6} \mathbf{1}_{2 \times 2}$.

Изменение итерационной ошибки δ при различных множителях сходимости μ показано на рисунке 1.

$$0 < \mu < 2 \left\{ \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \lambda_{\max} [A_{ij} A_{ij}^T] \lambda_{\max} [B_{ij} B_{ij}^T] \right\}^{-1},$$

$$\mu_0 = 2/239.7$$

Тогда единственными решениями исходной системы являются:

$$X_1 = \begin{bmatrix} 2.00 & 4.50 \\ -0.50 & 4.00 \end{bmatrix}, X_2 = \begin{bmatrix} -1.10 & -1.00 \\ 1.00 & 1.00 \end{bmatrix}.$$

Из графика 1, можно сделать вывод, что при увеличении μ от $\mu = 1/357.5$, $1/239.7$, $1/150$ до $1/75$, итерационная ошибка уменьшается и в конечном счете сходится к нулю. При увеличении показателя сходимости ошибка становится больше и алгоритм расходится.

Таким образом, решение системы матричных уравнений может быть найдено в виде рекуррентных соотношений. Итерационный метод был реализован в системе MATLAB. Эффективность алгоритма проиллюстрирована на примере.

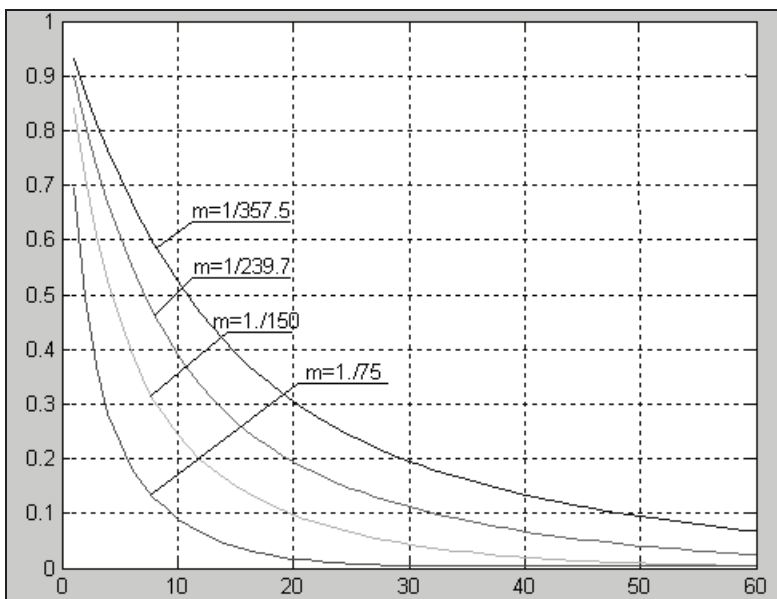


Рис. 1. График изменения относительной итерационной ошибки δ .

Список литературы

1. Гавришина О. Н., Екимова М. Р., Фомина Л. Н. Методы вычислений: учебно-метод. пособие. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2004. – 63 с.
2. Конев В.В. Линейная алгебра. Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2008. – 65 с.
3. Feng Ding, Tongwen Chen. On iterative solutions of general coupled matrix equations // SIAM J. Control Optim, 2006. – Vol. 44, No. 6. – P. 2269-2284.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Кольчатов А.М.,

кандидат технических наук, доцент

Емельянова Т.В.,

кандидат технических наук, доцент

Арзамасский политехнический институт (филиал)

Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (Арзамас)

emelyanova@apingu.edu.ru

Аннотация. Данная статья посвящена имитационному моделированию и его применению в задачах динамического программирования. В статье подробно описано решение задачи динамического программирования – выбор кратчайшего пути. Приводится программа моделирования движения автомобиля по заданной сети дорог. Программа написана на языке имитационного моделирования СИМУЛА-67. Статья заинтересует научных, инженерно-технических работников, и студентов технических вузов.

Ключевые слова: имитационное моделирование, динамическое программирование, параллельные процессы, язык имитационное моделирование СИМУЛА-67.

SIMULATION MODELING DYNAMIC PROGRAMMING PROBLEMS

A. Kolchatov, T. Emelyanova

Arzamas Polytechnic Institute (branch) of Nizhny Novgorod State Technical University
named after R.E. Alekseyev (Arzamas)

Abstract. This article focuses on simulation and its application in dynamic programming problems. The article described in detail the solution of dynamic programming - the shortest path selection. Simulation program provides the vehicle on a given road network. The program is written in simulation SIMULA-67. Article interested in scientific, engineering and technical staff, and students of technical universities.

Key words: simulation, dynamic programming, parallel processes, simulation language SIMULA-67.

Задачи динамического программирования, то есть многошаговые (многоэтапные) задачи оптимизации, представляют собой задачи математического программирования с аддитивными или мультипликативными целевыми функциями или сводятся к таковым, см., например, [1,2].

Метод динамического программирования позволяет заменить решение одной задачи со многими переменными последовательным решением ряда задач с меньшим числом переменных.

Принципом, на котором основывается оптимизация многошагового динамического процесса, а также особенности вычислительного процесса, реализующего метод динамического програм-

мирования, является принцип оптимальности Р. Беллмана.

Принцип оптимальности. Оптимальное решение обладает тем свойством, что каково бы ни было текущее состояние и “траектория”, приводящая в это состояние, последующие решения должны быть оптимальными относительно текущего состояния и не зависеть от способа как это состояние было достигнуто.

В качестве примера типовой задачи динамического программирования рассмотрим задачу поиска маршрута минимальной длины между двумя заданными городами, если задана сеть дорог, связывающая эти города (рис.1).

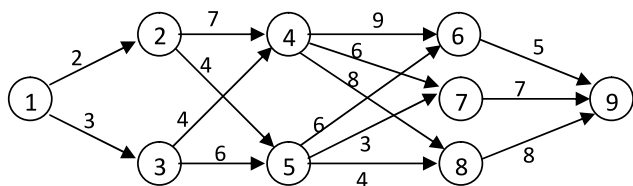


Рис. 1. Граф сети дорог

Процесс решения разбивается на шаги, нумерация которых осуществляется от конца к началу. В данном примере всего 4 шага (этапа). При $n=1$ выделяется подмножество городов $G_1 = \{6,7,8\}$, из которых конечный пункт (город 9) достигается за один этап (непосредственно). При $n=2$ выделяется подмножество городов $G_2 = \{4,5\}$, из которых непосредственной дороги в конечный город нет, а есть маршруты, связывающие их с конечным городом через города множества G_1 , то есть за два этапа. Продолжая дальше, получим множества $G_3 = \{2,3\}$ и $G_4 = \{1\}$, связывающие города этих подмножеств с конечным городом соответственно за 3 и 4 этапа. В последнем подмножестве должен находиться всего один исходный город. Обозначим через $G_0 = \{9\}$ подмножество, содержащее всего один конечный город.

Любой маршрут из города 1 в город 9 содержит ровно 4 дуги графа, каждая из которых связывает вершины соответствующих подмножеств.

Рассмотрим последний шаг ($n=1$) и вычислим для него значение целевой функции. В город 9 можно доехать из городов 6, 7 и 8. Вычислим длину пути до города 9 из этих городов:

$$f_1(6) = L_{6,9} = 5;$$

$$f_1(7) = L_{7,9} = 7;$$

$$f_1(8) = L_{8,9} = 8;$$

Условно оптимальное управление - это оптимальное управление, при условии что на данном этапе мы находимся в данном городе.

Условно оптимальные управления из каждого города подмножества G_1 будут $U_1(6) = 9$; $U_1(7) = 9$; $U_1(8) = 9$.

Условно оптимальные управления из городов подмножества G_2 находятся из условий вычисления

минимального пути из каждого города до конечного города 9:

$$f_2(4) = \min\{L_{4,6} + f_1(6), L_{4,7} + f_1(7), L_{4,8} + f_1(8)\} = \min\{9+5, 6+7, 8+8\} = 13.$$

Значит условно оптимальное управление из города 4 в конечный город 9 $U_2(4) = 7$, так как из города 4 маршрут 4-7-9 в город 9 имеет минимальную длину, равную 13.

Аналогично

$$f_2(5) = \min\{L_{5,6} + f_1(6), L_{5,7} + f_1(7), L_{5,8} + f_1(8)\} = \min\{6+5, 3+7, 4+8\} = 10 \text{ и } U_2(5) = 7.$$

Продолжая процесс для $n=3$ и $n=4$, получим

$$f_3(2) = \min\{L_{2,4} + f_2(4), L_{2,5} + f_2(5)\} = \min\{7 + 13, 4 + 10\} = 14, U_3(2) = 5;$$

$$f_3(3) = \min\{L_{3,4} + f_2(4), L_{3,5} + f_2(5)\} = \min\{4 + 13, 6 + 10\} = 16, U_3(3) = 5;$$

$$f_4(1) = \min\{L_{1,2} + f_3(2), L_{1,3} + f_3(3)\} = \min\{2 + 14, 3 + 16\} = 16, U_4(1) = 2.$$

Итак, минимальная длина пути составляет 16 единиц, оптимальный маршрут: 1-2-5-7-9.

Аналогично можно решать задачи, когда требуется найти не минимальное значение целевой функции, а максимальное. В этом случае на каждом шаге операцию $\min\{\}$ нужно заменить на операцию $\max\{\}$.

Заметим, что задачи с мультипликативной целевой функцией в случае положительных мультипликаторов сводятся к задаче с аддитивной целевой функцией путем замены целевой функции на ее логарифм.

Заметим также, что в качестве расстояния между городами может выступать любая неотрицательная функция, которая будет мерой "расстояния" между городами, например, стоимость перевозимого груза по маршруту.

Здесь рассмотрен пример, когда подмножества G_j выделяются однозначно. Однако может быть такой случай, когда из текущего города до конечного могут существовать маршруты с разным количеством шагов (этапов) достижимости, что накладывает некоторые трудности на компьютерную реализацию приведенного алгоритма.

Предлагается решать такого рода задачи с помощью имитационного моделирования движения “автомобилей” по сети дорог, начиная с исходного города. Процесс начинается с одновременного запуска автомобилей с постоянными одинаковыми скоростями по каждой из дорог, выходящей из города. Время движения до города, куда ведет дорога, пропорционально “длине” дороги, по которой движется соответствующий автомобиль. Как только какой-то автомобиль достигает нового города, запускаются в движение новые автомобили по всем дорогам, выходящим из этого города. Разумеется запуск автомобилей в каком-то городе происходит только при первом посещении этого города, тем самым будут отсекаются неконкурентоспособные маршруты. Процесс заканчивается, когда первый автомобиль достигнет конечного города.

Ниже приводится программа такой имитационной модели, написанная на языке СИМУЛА-67. Этот язык был разработан специально для имитационного моделирования дискретных систем (его название происходит от слова simulation - моделирование). СИМУЛА-67, к сожалению незаслуженно “забытый”, дает богатый набор языковых средств, максимально упрощающих программирование имитационных моделей дискретных систем. Описание языка и как работать с ним можно найти, например, в [3].

```
external class terminal;
terminal begin
  /* декларация глобальных параметров */
  integer N,nn,nk;
  real dlway;
```

/* N - количество городов; nn - номер города, откуда начинается путь; nk -номер города, где заканчивается путь; dlway - минимальная длина пути(искомый параметр) */

```
  open (25, 80);
  outtext(“Vvedite obshee kolichestvo gorodov=”);
  N:= inint(3);outtext (“->”);outint(N,3);outline(“<-”);
simulation
```

```
begin
  /* автомобиль */
  process class auto(w);ref(way)w;
  begin
    hold(w.distance);
    w.kuda.pribyl:-w;
    activate w.kuda;
  end;

  /* автомобиль */
  /* дорога */
  link class way;
  begin
    ref(city)otkuda,kuda;
    real distance;
  end;

  /* дорога */
  /* город */
  process class city(numer);integer numer;
  begin
    ref(head) ways;
    ref(way)w,pribyl,wp;
    boolean nebyl;
    nebyl:= true;
    ways:- new head;
  while true do
    begin
      passivate;
      if numer = nk then
        begin wp:-pribyl;
          dlway:= time;
          reactivate MP;
        end else
      if nebyl then
        begin
          wp:- pribyl;
          nebyl:= false;
          for w:-ways.first,w.suc while w /= none
            activate new auto(w);
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
```

```

end;
end;

/* город */
ref(process) MP;
integer i,j,m,kd;
real h;
ref(city)array citys(1:N);
ref(city)c;
ref(way)w;
ref(head)put;
boolean b;
MP:-current;
put:-new head;

/* генерация городов */
for i:= 1 step 1 until N do
begin
citys(i) :- new city(i);
activate citys(i);
end;

/* для каждого города генерация и ввод данных
о дорогах */
for i:= 1 step 1 until N do
begin
outtext("vvedite chislo dorog iz goroda");
outint(i,3);outtext("<-");
kd:=inint(3);outint(kd,3);
for j:= 1 step 1 until kd do
begin
w:-new way;
w.otkuda:-citys(i);
outtext("nomer goroda,kuda doroga=");
m:=inint(3);
w.kuda:-citys(m);
outtext("dlina dorogi=");
w.distance:=inreal(10);
w.into(citys(i).ways);
end;
end;

/*генерация сети закончена */

outtext("vvedite nomer isxodnogo goroda=");
nn:=inint(3);outline("<-");
outtext("vvedite nomer konechnogo goroda=");
nk:=inint(3);outline("<-");
outtext(" vvedite verxnuu ocenku minimalnogo
puty=");
h:= inreal(10);

/* Начали движение из начального города */
activate citys(nn);
hold(h);

/* моделирование закончено, вывод результатов
моделирования */
outtext("min dlina puty=");
outfix(dlway,2,8);
outline("<-");

/* Вывод пути */
outtext("Marshrut=");
b:=true;
c:-citys(nk);
while b do
begin
c.into(put);
if c.numer = nn then b:=false else c:-c.wp.otkuda;
end;
for c:-put.last,c.pred while c/=none do
outint(c.numer,5);
outline("Hit a key: ");
inchar;
end;
/* simulation */
end;
/* terminal */

Приведенная программа для сети (рис.1) выдала
следующий результат:
min dlina puty = 16
Marshrut = 1 2 5 7 9

Поясним структуру приведенной программы.
В программе имеются объекты трех классов - ав-
```

томобили (класс `auto`), дороги (класс `way`) и города (класс `city`). Объекты классов `auto` и `city` объявлены как процессы (`process`), то есть их “жизнь” привязана к системному времени, а объекты класса `way` объявлены как звенья (`link`) - могут быть членами двунаправленных списков.

Объекты класса `way` имеют атрибуты `otkuda`, `kuda` и `distance`. Первые два - это ссылки на объекты класса `city`, показывают, соответственно, откуда начинается дорога и куда она ведет. Третий атрибут указывает на длину дороги. Объекты этого класса в программе используются только как хранилище данных о дорогах сети - никакого сценария жизни у них нет.

Объект класса `auto` имеет атрибуты `w` - ссылку на объект класса `way`, показывающую по какой дороге поедет данный автомобиль. Сценарий жизни объекта класса `auto` следующий: первый оператор `hold(w.distance)` планирует следующую активную фазу объекта на момент системного времени `time` (текущий момент системного времени) + `w.distance` (длина дороги `w`). Так как автомобили едут с постоянными одинаковыми скоростями, то в качестве системного времени в данной модели используется длина пройденного пути. Следующим оператором городу, в который едет автомобиль указывается дорога, по которой он едет. Последний оператор активизирует город, в который едет автомобиль.

Объект класса `city` имеет атрибуты `numeg`, `ways`, `w`, `pribyl`, `wp` и `nebyl`. Атрибут `numeg` - это номер города в сети, переменная целого типа. Атрибут `ways` двунаправленный список (объект класса `head`) - членами которого являются объекты класса `way` (дороги, выходящие из данного города). Атрибуты `w`, `pribyl`, `wp` - это ссылки на объекты класса `way`: `w` - рабочая ссылка, ссылка `pribyl` указывает на дорогу, по которой прибывает в город очередной автомобиль, а ссылка `wp` указывает на дорогу, по которой прибыл в город первый автомобиль. Булевская переменная `nebyl` указывает был или нет в городе автомобиль (`nebyl = true` автомобилей еще не было: после приезда в город первого автомобиля ее значение становится `false`). Посредством этой пере-

менной отсекаются заведомо неконкурентоспособные маршруты. Сценарий жизни объекта класса `city` следующий: переменной `nebyl` присваивается значение `true`, генерируется список `ways`, затем бесконечный цикл, внутри которого первый оператор (`passivate`) приостанавливает “жизнь” города (делает себя пассивным) и ждет, когда его активизирует очередной автомобиль, который едет в этот город. После активации он убеждается является ли этот город конечным городом: если да, то запоминается дорога (в переменной `wp`), по которой прибыл автомобиль, фиксируется (в переменной `dlway`) минимальная длина пути (значение системного времени `time` прибытия первого автомобиля в конечный пункт), в противном случае, если это первый автомобиль (значение `nebyl true`), запускаются в движение новые автомобили (`activate new auto(w)`) по всем выходящим из этого города дорогам (цикл по всем дорогам из списка дорог данного города `ways`). Переменной `nebyl` присваивается значение `false`.

В модели присутствует еще один процесс - главная программа. Ссылка на нее `MP` нужна для того, чтобы закончить моделирование по достижении конечного пункта (оператор `reactivate(MP)` в теле класса `city`). В главной программе декларируются ссылка `MP`, рабочие переменные `i`, `j`, `m`, `kd`, `h`, `b`, рабочие ссылки `s`, `w`, `put`, а также массив ссылок на города сети (`ref(city)array citys(1:N)`). Сценарий жизни главной программы заключается в следующем: заготавливается ссылка на себя (`MP`), производится генерация городов, затем для каждого города проводится генерация сети дорог, вводятся номера начального (`nn`) и конечного (`nk`) пунктов, активизируется начальный город (`activate citys(nn)`) и главная программа планирует свою следующую активную фазу (`hold(h)`) на время `time+h`, где вводимая перед этим величина `h` - любое число, большее искомого минимального пути - верхняя его оценка. После окончания моделирования производится вывод результатов - величины минимального пути (`dlway`) и маршрута следования.

Заметим, что моделировалась система с параллельными процессами, для реализации этой

параллельности в языке СИМУЛА-67 используется так называемая квазипараллельная система исполнения. Конечно, в компьютере все вычисления происходят последовательно, по мере возрастания системного времени происходящих в системе событий, сортировка и вставка уведомлений о событиях в системный список по возрастанию системного времени скрыто от пользователя и реализовано в системе достаточно эффективно.

Таким образом, подробное рассмотрение предложенной программы имитационной модели показывает ее простоту, наглядность, ясность и прозрачность. Структура программы аналогична структуре моделируемой системы, что уменьшает вероятность ошибки при написании такого рода программ имитационных моделей. Мы выражаем уверенность, что в дальнейшем имитационный подход окажется плодотворным для решения и других математических задач.

Список литературы

1. А.В. Кузнецов, В.А. Сакович, Н.И. Холод. Высшая математика. Математическое программирование/Под общей редакцией профессора А.В. Кузнецова. - Минск, Вышэйшая школа, 2001.
2. А.В. Кузнецов, Н.И. Холод, Л.С. Костевич. Руководство к решению задач по математическому программированию/Под общей редакцией А.В. Кузнецова. - Минск, Вышэйшая школа", 2001.
3. А.Н. Андрианов, С.П. Бычков, А.И. Хорошилов. Программирование на языке симула-67/Под редакцией А.Н. Мямлина. - М., Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985.

СИНТЕЗ 1-АДАМАНТИЛТРИАЗОЛТИООНОВ

Аббуд А. Ф.

Московский государственный университет тонких химических технологий им. М. В. Ломоносова;
Мучеников Фонд - Председательство министров (Ирак).
amar.farman@yahoo.com

Сенан И. М.

к.х.н., Московский государственный университет
тонких химических технологий им. М. В. Ломоносова
abramko77@yahoo.com

Аннотация. Взаимодействие адамантилгидразида с алкилизотиоцианатами приводит к образованию адамантилтиосемикарбазидов, а их внутримолекулярная циклизация приводит к получению ряда адамантилтриазолтиоонов.

Ключевые слова: адамантан, 1-адамантанкарбоновая кислота, 1-адамантилгидразид, 2-(1-адамантилкарбонил)-N-аллилтиосемикарбазид, 2-(1-адамантилкарбонил)-N-(2-метоксиэтил)тиосемикарбазид, 2-(1-адамантилкарбонил)-N-(3-метоксипропил)тиосемикарбазид, 5-(1-адамантил)-4-аллил-2,4-дигидро-3H-1,2,4-триазол-3-тион, 5-(1-адамантил)-4-(2-метоксиэтил)-2,4-дигидро-3H-1,2,4-триазол-3-тион, 5-(1-адамантил)-4-(3-метоксипропил)-2,4-дигидро-3H-1,2,4-триазол-3-тион.

SYNTHESIS OF 1-ADAMANTYL TRIAZOLE THIONES

Abbood A. F.

Moscow State University of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov.
Establishment of martyrs - Presidency of ministers (Iraq).

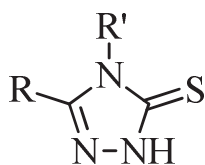
Senan I. M.

Moscow State University of Fine Chemical Technologies named after M.V. Lomonosov.

Abstract. Reacting the adamantyl hydrazide with alkyl isothiocyanates leads to the formation of adamantyl thiosemicarbazides and their intramolecular cyclization leads to the formation adamantyl triazole thiones.

Keywords: adamantane, adamantane-1-carboxylic acid, adamantane-1-carbohydrazide, 2-(1-adamantylcarbonyl)-N-allylhydrazinecarbothioamide, 2-(1-adamantylcarbonyl)-N-(2-methoxyethyl)hydrazinecarbothioamide, 2-(1-adamantylcarbonyl)-N-(3-methoxypropyl)hydrazinecarbothioamide, 5-(1-adamantyl)-4-allyl-2,4-dihydro-3H-1,2,4-triazole-3-thione, 5-(1-adamantyl)-4-(2-methoxyethyl)-2,4-dihydro-3H-1,2,4-triazole-3-thione, 5-(1-adamantyl)-4-(3-methoxypropyl)-2,4-dihydro-3H-1,2,4-triazole-3-thione.

Синтез соединений, содержащих кольца 1,2,4-триазола [1-3], привлекает внимание, главным образом, в связи с их широким диапазоном фармакологических свойств. Разнообразие биологической активности: противовоспалительной, антибактериальной, противогрибковой, противотуберкулезной и противовирусной - было обнаружено для замещенных 1,2,4-триазол-3-тиона [4,5].



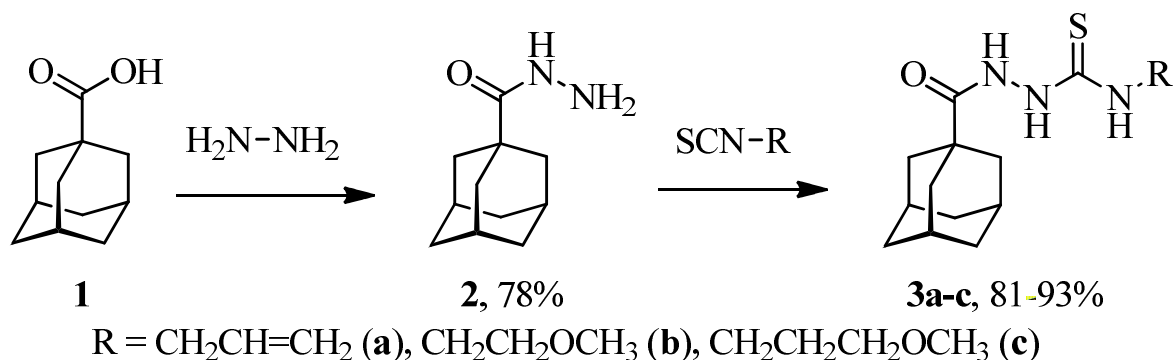
1,2,4-триазол-3-тионы

Известно, что в синтезе 1,2,4-триазолов используются тиосемикарбазиды, нами были получены по схеме 1.

Гидразид **2** синтезировали непосредственным нагреванием 1-адамантилкарбоновой кислоты **1** в избытке гидразингидрата с выходом 78%. Гидразид **2** представляет собой кристаллический продукт белого цвета с т. пл. 148-150°C. В масс-спектре соединения **2** имеется пик молекулярного иона (M^+ 194).

Взаимодействие гидразида **2** с эквимолярным количеством алкил-изотиоцианатов в среде изопропилового спирта при кипении в течение 3 часов приводит к образованию тиосемикарбазидов **3a-c** почти с количественным выходом.

Схема 1



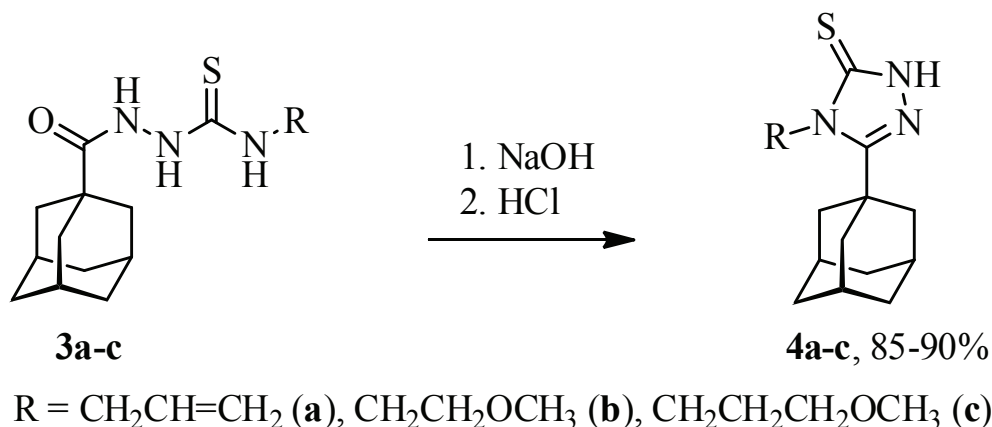
Синтезированные 2-(1-адамантилкарбонил)-*N*-замещенные тиосемикарбазиды **3a-c** являются исходными продуктами для получения гетероциклических соединений.

Внутримолекулярная циклизация полученных тиосемикарбазидов **3a-c** приводит к получению ряда триазолтионов **4a-c** с выходом от 85 до 90%. Реакция происходит при кипячении в течение 3 часов в растворе щелочи с последующей обработкой реакционной смеси разбавленной HCl при комнатной температуре и далее нейтрализацией поташом до pH 7-8. Выпавший осадок отфильтровали и промыли водой.

А в ИК спектрах соединений **4a-c** наблюдается отсутствие полосы поглощения C=O группы, что подтверждает их циклизацию, также отсутствие полосы поглощения SH-группы, что подтверждает существование соединений **4a-c** в тионной форме.

В ¹H-ЯМР спектре соединений **3a-c** наблюдается группа сигналов, характерных для adamantанового каркаса, состоящих из синглетных сигналов протонов, расположенных возле узловых атомов углерода при 2.09 м.д. и синглетных сигналов протонов при мостиковых атомах углерода в области 2.08 -1.93 м. д. и 1.79-1.76 м.д. Кроме того, в спектрах ¹H-ЯМР соеди-

Схема 2



В ИК спектрах всех тиосемикарбазидов **3a-c** наблюдаются полосы валентных колебаний группы C=S в области 1218-1213 см⁻¹ и групп C=O и N-H в области 1668-1666 см⁻¹ и 3490-3185 см⁻¹ соответственно.

В ИК спектрах соединений **3a-c** наблюдаются при 9.83- 9.53 м.д. уширенные синглетные сигналы протонов группы NH.

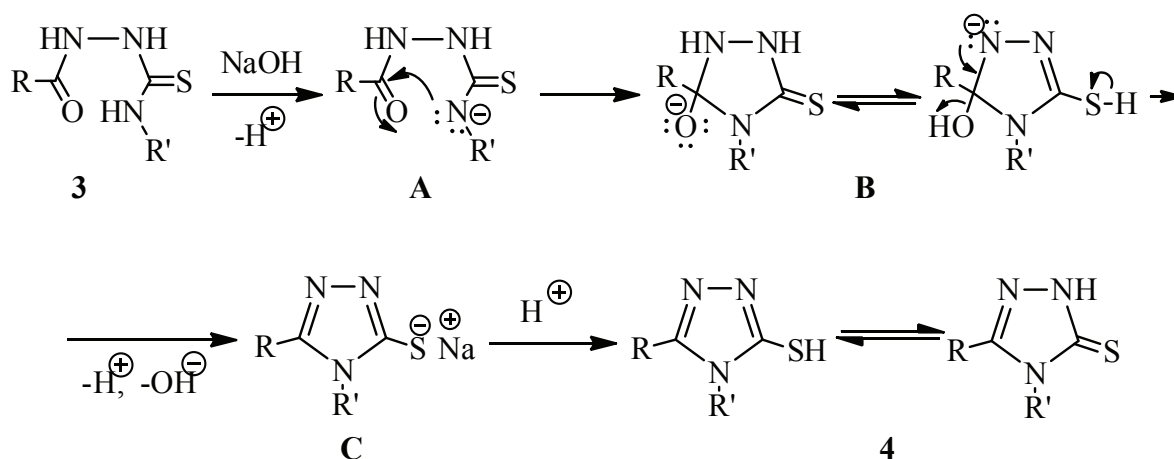
В масс-спектрах всех полученных соединений имеются сигналы молекулярных ионов.

Полученные соединения представляют собой кристаллы белого цвета. Их состав подтвержден также элементным анализом.

Авторы статьи [4] высказывают предположение, что циклизацию тиосемикарбазидов можно объяснить следующим механизмом (Схема 3).

акций и индивидуальностью веществ осуществляли методом ТСХ на пластинках Silufol UV-254. Пятна проявляли парами йода во влажной камере. Температуры плавления определяли на приборе ПТП-М.

Схема 3



Экспериментальная часть

В работе использовали перегнанные растворители и реагенты отечественного производства «х.ч.» и зарубежного производства аллилизотиоцианат, 2-метоксиэтилзотиоцианат, 3-метоксипропилзотиоцианат и 1-адамантилкарбоновой кислоты (Sigma-Aldrich).

ИК-спектры исследуемых соединений регистрировали на спектрофотометре «Bruker IFSv» в таблетках с KBr. Спектры ЯМР ^1H и ^{13}C растворов веществ в CDCl_3 записывали на спектрометре «Bruker AM-300» с рабочей частотой 300.13 МГц для ^1H и 75.47 МГц для ^{13}C , внутренний стандарт — SiMe_4 . Масс-спектры электронного удара регистрировали на приборе «MS-30 Kratos» с прямым вводом образца в ионный источник при энергии ионизирующих электронов 70 эВ, температуре ионного источника 200 °С. Контроль за ходом ре-

Гидразид 1-адамантанкарбоновой кислоты (2).

Смесь 10.00 г (56 ммоль) 1-адамантилкарбоновой кислоты **1** и (112 ммоль) гидразингидрата нагревали при кипении 1 ч. После охлаждения выпавший осадок отфильтровывали и перекристаллизовывали из толуола. Выход 8.50 г (78%) кристаллы белого цвета, т.пл. 148-150°C (из толуола). Найдено (%): C, 67.93; H, 9.54; N, 14.36. $\text{C}_{11}\text{H}_{18}\text{N}_2\text{O}$. Вычислено (%): C, 68.01; H, 9.34; N, 14.42. Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$ (%)): 194 [M]⁺ (9), 163 (9), 135 (100), 107 (7), 93 (14), 79 (17), 41 (10), 31 (16).

2-(1-Адамантилкарбонил)-N-аллилтиосемикарбазид (3a).

Смесь 1.94 г (10 ммоль) гидразида 1-адамантанкарбоновой кислоты **2** и 1.00 г (10 ммоль) аллилизотиоцианата в 20 мл *i*-PrOH нагревали при кипении 3 ч. Выливали в воду. Выпавший осадок отфильтровыва-

ли. Промывали на фильтре эфиром и перекристаллизовывали из *i*-PrOH. Выход 2.80 г (93%), кристаллы белого цвета, т.пл. 170-172 °С (из *i*-PrOH). Найдено (%): С, 61.39; Н, 7.94; N, 14.16. C₁₅H₂₃N₃OS. Вычислено (%): С, 61.40; Н, 7.90; N, 14.32. ИК-спектр, $\nu/\text{см}^{-1}$: 1218 (C=S), 1643 (C=C), 1666 (C=O), 3185, 3205, 3291 (NH). Спектр ЯМР ¹H (δ , м.д., J/Гц): 1.75 (с, 6 Н, 3 CH₂CH (Ad)); 1.90 (с, 6 Н, 3 CH₂C (Ad)); 2.09 (с, 3 Н, 3 CH (Ad)); 4.27 (с, 2 Н, CH₂NH); 5.24 (м, 2 Н, CH₂=CH); 5.91 (м, 1 Н, CH₂=CH); 9.83 (уш. с, 3 Н, 3 NH). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{омн}}$ (%)): 293 [M]⁺ (2), 260 (3), 180 (18), 135 (94), 115 (100), 93 (21), 79 (27), 41 (53).

2-(1-Адамантилкарбонил)-*N*-(2-метоксиэтил) тиосемикарбазид (3b).

Смесь 1.94 г (10 ммоль) гидразида 1-адамантанкарбоновой кислоты **2** и 1.20 г (10 ммоль) 2-метоксиэтилзотиоцианата в 20 мл *i*-PrOH нагревали при кипении 3 ч. Выливали в воду. Выпавший осадок отфильтровывали, промывали на фильтре эфиром и перекристаллизовывали из *i*-PrOH. Выход 2.60 г (81%), кристаллы белого цвета, т.пл. 140-142 °С (из *i*-PrOH). Найдено (%): С, 57.79; Н, 8.14; N, 13.43. C₁₅H₂₅N₃OS. Вычислено (%): С, 57.85; Н, 8.09; N, 13.49. ИК-спектр, $\nu/\text{см}^{-1}$: 1103 (C-O-C), 1213 (C=S), 1666 (C=O), 3293, 3347, 3374 (NH). Спектр ЯМР ¹H (δ , м.д., J/Гц): 1.76 (с, 6 Н, 3 CH₂CH (Ad)); 1.99 (с, 6 Н, 3 CH₂C (Ad)); 2.09 (с, 3 Н, 3 CH (Ad)); 3.36 (с, 3 Н, CH₃O); 3.55 (т, 2 Н, CH₂O, $J = 5.0$); 3.79 (м, 2 Н, CH₂NH); 9.51 (уш. с, 3 Н, 3 NH). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{омн}}$ (%)): 311 [M]⁺ (14), 278 (5), 220 (6), 180 (7), 163 (3), 135 (100), 101 (34), 79 (15), 45 (12).

2-(1-Адамантилкарбонил)-*N*-(3-метоксипропил) тиосемикарбазид (3c).

Смесь 1.94 г (10 ммоль) гидразида 1-адамантанкарбоновой кислоты **2** и 1.31 г (10 ммоль) 3-метоксипропилзотиоцианата в 20 мл *i*-PrOH нагревали при кипении 3 ч. Выливали в воду. Выпавший осадок отфильтровывали, промывали на фильтре эфиром и перекристаллизовывали из *i*-PrOH. Выход 2.90 г (86%), кристаллы белого цвета, т.пл. 155-157 °С (из *i*-PrOH). Найдено (%): С, 58.92; Н, 8.24; N, 12.86. C₁₆H₂₇N₃OS. Вычислено (%): С, 59.04; Н, 8.36; N, 12.91. ИК-спектр,

$\nu/\text{см}^{-1}$: 1114 (C-O-C), 1218 (C=S), 1668 (C=O), 3268, 3490 (NH). Спектр ЯМР ¹H (δ , м.д., J/Гц): 1.76 (с, 6 Н, 3 CH₂CH (Ad)); 1.88 (м, 2 Н, CH₂CH₂CH₂); 1.93 (с, 6 Н, 3 CH₂C (Ad)); 2.09 (с, 3 Н, 3 CH (Ad)); 3.34 (с, 3 Н, CH₃O); 3.48 (т, 2 Н, CH₂O, $J = 5.9$); 3.67 (т, 2 Н, CH₂NH, $J = 6.6$); 9.53 (уш. с, 3 Н, 3 NH). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{омн}}$ (%)): 325 [M]⁺ (34), 292 (27), 180 (10), 163 (6), 135 (100), 93 (14), 79 (16), 45 (18).

5-(1-Адамантил)-4-аллил-2,4-дигидро-3H-1,2,4-триазол-3-тион (4a).

Смесь 0.88 г (3 ммоль) 2-(1-адамантилкарбонил)-*N*-аллил тиосемикарбазид **3a** и 0.30 г (7 ммоль) NaOH в 10 мл воды нагревали при кипении 4 ч. Охлаждали, добавляли соляную кислоту, нейтрализовали K₂CO₃ до pH 7-8. Выпавший осадок отфильтровывали, промывали водой. Выход 0.80 г (85%), кристаллы белого цвета, т.пл. 240-242 °С. Найдено (%): С, 65.39; Н, 7.54; N, 15.16. C₁₅H₂₁N₃S. Вычислено (%): С, 65.41; Н, 7.69; N, 15.26. ИК-спектр, $\nu/\text{см}^{-1}$: 1184 (C=S), 1544 (C=N), 1641 (C=C), 3116 (NH). Спектр ЯМР ¹H (δ , м.д., J/Гц): 1.79 (с, 6 Н, 3 CH₂CH (Ad)); 2.04 (с, 6 Н, 3 CH₂C (Ad)); 2.12 (с, 3 Н, 3 CH (Ad)); 4.91 (с, 2 Н, CH₂N); 5.04, 5.32 (д д, 2 Н, CH₂=CH, $J = 16.0, 11.0$); 5.93 (м, 1 Н, CH₂=CH); 7.27 (с, 1 Н, NH). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{омн}}$ (%)): 275 [M]⁺ (100), 260 (73), 242 (13), 218 (14), 178 (4), 135 (14), 105 (3), 79 (9), 41 (24).

5-(1-Адамантил)-4-(2-метоксиэтил)-2,4-дигидро-3H-1,2,4-триазол-3-тион (4b).

Смесь 0.93 г (3 ммоль) 2-(1-адамантилкарбонил)-*N*-(2-метоксиэтил) тиосемикарбазид **3b** и 0.30 г (7 ммоль) NaOH в 10 мл воды нагревали при кипении 4 ч. Охлаждали, добавляли соляную кислоту, нейтрализовали K₂CO₃ до pH 7-8. Выпавший осадок отфильтровывали, промывали водой. Выход 0.85 г (90%), кристаллы белого цвета, т.пл. 160-162 °С. Найдено (%): С, 61.36; Н, 7.84; N, 14.26. C₁₅H₂₃N₃OS. Вычислено (%): С, 61.40; Н, 7.90; N, 14.32. ИК-спектр, $\nu/\text{см}^{-1}$: 1141 (C-O-C), 1213 (C=S), 1546 (C=N), 3120 (NH). Спектр ЯМР ¹H (δ , м.д., J/Гц): 1.79 (с, 6 Н, 3 CH₂CH (Ad)); 2.08 (с, 6 Н, 3 CH₂C (Ad)); 2.13 (с, 3 Н, 3 CH (Ad)); 3.38 (с, 3 Н, CH₃O); 3.53 (т, 2 Н, CH₂O, $J = 5.1$); 4.30 (т, 2 Н,

CH_2N , $J = 8.0$); 7.27 (с, 1 H, NH). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$ (%)): 293 $[\text{M}]^+$ (32), 260 (5), 235 (100), 192 (3), 178 (11), 135 (4), 91 (4), 58 (13), 29 (8).

5-(1-Адамантил)-4-(3-метоксипропил)-2,4-дигидро-3H-1,2,4-триазол-3-тион (4с).

Смесь 0.98 г (3 ммоль) 2-(1-адамантилкарбонил)-N-(3-метоксипропил) тиосемикарбазида **3с** и 0.30 г (7 ммоль) NaOH в 10 мл воды нагревали при кипении 4 ч. Охлаждали, добавляли соляную кислоту, нейтрализовали K_2CO_3 до pH 7-8. Выпавший осадок отфиль-

тровывали, промывали водой. Выход 0.80 г (85%), кристаллы белого цвета, т.пл. 175-177 °С. Найдено (%): C, 62.39; H, 8.14; N, 13.60. $\text{C}_{16}\text{H}_{25}\text{N}_3\text{OS}$. Вычислено (%): C, 62.50; H, 8.20; N, 13.67. ИК-спектр, $\nu/\text{см}^{-1}$: 1124 (C-O-C), 1203 (C=S), 1538 (C=N), 3108 (NH). Спектр ЯМР ^1H (δ , м.д., $J/\text{Гц}$): 1.80 (с, 6 H, 3 CH_2CH (Ad)); 1.88 (м, 2 H, $\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2$); 2.09 (с, 6 H, 3 CH_2C (Ad)); 2.13 (с, 3 H, 3 CH (Ad)); 3.39 (с, 3 H, CH_3O); 3.83 (т, 2 H, CH_2O , $J = 6.2$); 4.41 (т, 2 H, CH_2NH , $J = 6.6$); 7.27 (с, 1 H, NH). Масс-спектр, m/z ($I_{\text{отн}}$ (%)): 307 $[\text{M}]^+$ (18), 274 (100), 236 (12), 218 (3), 192 (4), 135 (5), 91 (3), 79 (4), 45 (9).

Список литературы

1. M. Amir, K. Shikha, *European Journal of Medicinal Chemistry*, **2004**, 39, 535–545.
2. H. Kumar, S. A. Javed, S. A. Khan, M. Amir, *European Journal of Medicinal Chemistry*, **2008**, 43, 2688–2698.
3. G. A. Senchyk, A. B. Lysenko, E. B. Rusanov, A. N. Chernega, H. Krautscheid, K. V. Domasevitch, *Inorganica Chimica Acta*, 2009, 362, 4439–4448.
4. O. D. Cretu, S. F. Barbuceanu, G. Saramet, C. Draghici, *J. Serb. Chem. Soc.*, **2010**, 75 (11), 1463–1471.
5. Raafat M. Shaker, *ARKIVOC*, **2006**, (ix) 59-112.

НОРМИРОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ КАРПАТО-ПОДОЛЬСКОГО РЕГИОНА

Гопченко Е.Д.,

Доктор географических наук, профессор, Одесский государственный экологический университет
sweetymild@gmail.com

Явкин В.Г.,

Кандидат географических наук, доцент,
Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
vjacheslavjavkin@gmail.com

Мельник А.А.,

Кандидат географических наук,
Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича
melanton85@mail.ru

Аннотация. Статистическим анализом удлиненных рядов наблюдений (до 2010 года) подготовлены параметры и коэффициенты двооператорной модели расчета дождевого паводка Бефани-Гопченко. Оценены свойства пространственного распределения и адаптация для расчета максимального стока паводков. Предлагаемый метод обоснован и удобен в задачах подготовки региональных нормативных документов для определения основных расчетных гидрологических характеристик.

Ключевые слова: инженерные расчеты максимального стока, слой паводка, модуль максимального стока, рельеф, Карпато-Подолье.

RATIONING OF CALCULATED CHARACTERISTICS OF RAINFALL FLOODS IN CARPATHO-PODOLYE REGION

Hopchenko E.D.,

Odessa State Environmental University

Yavkin V.G., Melnyk A.A.,

Chernivtsi National University named after Yuriy Fedkovych

Abstract. Statistical analysis of elongated series of observations (up to 2010) prepared parameters and coefficients of the model calculation dvooperatornoy rain floods Befani-Gopchenko. Evaluated properties of the spatial distribution and adaptation to calculate the maximum flood flow. The proposed method is justified and useful tasks in the preparation of regional regulations to determine the basic design hydrological characteristics.

Keywords: engineering calculations of maximum runoff, flood layer, module of maximum runoff, relief, Carpatho-Podolye.

При расчетах максимального стока следует иметь в виду, что исходные материалы, используемые в нормативах, основанные на данных наблюдений до 60-х годов и требуют обязательного уточнения [3,7].

Гопченко Е.Д., осуществлен анализ методики нормативных документов СНиП 2.01.14-83 и СП 22-101-203 [2,4,5] и выявлен ряд недостатков. Расчетные формулы не в полной мере учитывают основные стокоформирующие факторы и особенности влияния каждого из них на величины максимального стока.

Модифицированный вариант модели А.Н. Бефани [1] позволяет объединять расчетные методы редуccionного, объемного и генетического типов. Он предусматривает определение некоторых расчетных параметров (коэффициентов руслопойменного регулирования, неравномерности склонового стока во времени, расчетной продолжительности притока воды со склонов к русловой сети), а также географические обобщения (продолжительности притока воды со склонов к русловой сети и слоев стока). Предложенная модель универ-

сальна как для дождевых паводков, так и весеннего половодья.

Анализ длительных временных рядов по максимальному стоку рек Украины и других стран указывает на то, что начиная с 80-х годов прошлого столетия проявляются временные тренды различного направления [2,3,7].

В основу методики расчета характеристик максимального стока на принципиально новых началах положена математическая модель операторного типа. Она охватывает весь диапазон водосборных площадей, начиная от отдельных склонов до самых больших разветвленных речных систем, и позволяет учитывать весь комплекс стокообразующих факторов [2,6,7].

Расчетные методы определения максимального мгновенного расхода воды дождевого паводка прямо или косвенно используют большое количество характеристик, которые подвергаются изменениям под влиянием антропогенной нагрузки в бассейне. В двооператорной модели расчета максимального стока паводков Бефани-Гопченко такими характеристиками в первую очередь являются:

$\frac{n+1}{n}$ - коэффициент временной неравномерности склонового притока;

T_0 - продолжительность склонового притока;

Y_m - расчетный слой стока паводков и половодий;

T_n - продолжительность паводков или половодий;

$k_m = \frac{m+1}{\frac{m}{n+1}}$ - коэффициент трансформации формы гидрографов стока;

$\psi\left(\frac{t_p}{T_0}\right)$ - параметр русловой трансформации.

Блок-схема двухоператорной модели приведена на рис.1:

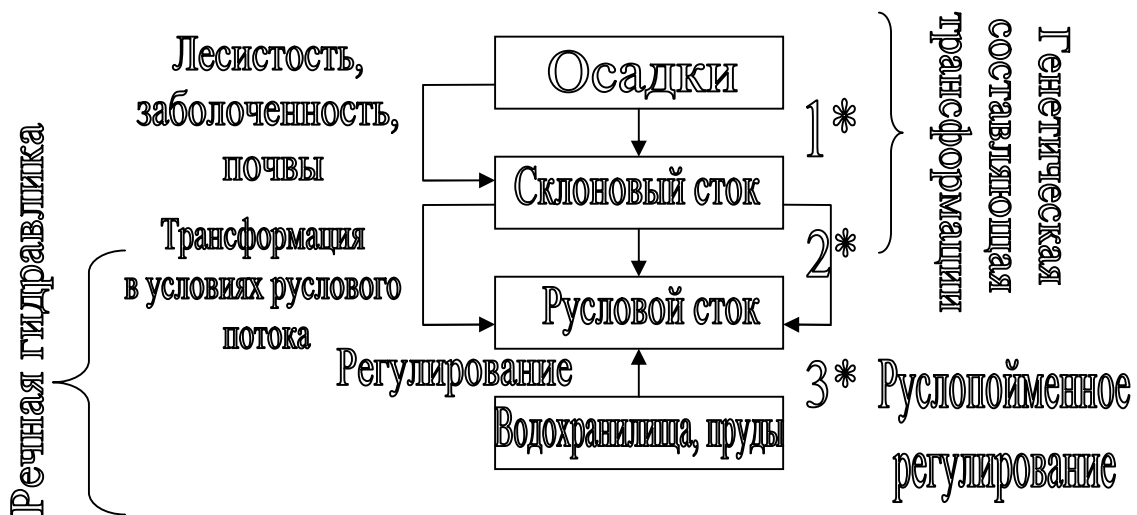


Рис. 1. Схема двухоператорной модели формирования гидрографа паводка.
 1 * - склоновый сток, 2 * - трансформация склонового в русловой, 3 * - русловая трансформация.

$$1 * - \partial(n+1)y^n \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = h_i;$$

$$2 * - q'_m = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} Y_m; 3 * - q_m = q'_m \Psi \left(\frac{t_p}{T_0} \right) q_p \quad (1)$$

ξ - руслопойменное регулирование; q_m - модуль максимального стока; Y_m - максимальный слой стока; h_i - слой склонового стока (эффективные осадки); q_p - модуль максимального стока заданного паводка соответствующей обеспеченности p .

Для нормирования расчетных параметров дождевых паводков в пределах Карпато-Подольского региона принята структура:

$$q_p = q'_{1\%} \cdot k_F \cdot \lambda_p \cdot r, \quad (2)$$

где q_p - максимальный модуль стока дождевого паводка обеспеченностью $P\%$ (м³ / с • км²);

$q'_{1\%}$ - максимальный модуль склонового притока обеспеченностью $P = 1\%$ (м³ / с • км²).

$$q'_{1\%} = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0} Y_{1\%} = k'_0 Y_{1\%}, \quad (3)$$

$Y_{1\%}$ - расчетный слой паводкового стока обеспеченностью $P = 1\%$ (мм);

$k'_0 = \frac{n+1}{n} \frac{1}{T_0}$ - коэффициент склоновой трансформации паводкового стока;

$k_F = k_m k_n$ - сборный коэффициент руслового (k_m) и русло-пойменного (k_n) регулирования;

λ_p - коэффициент перехода от опорной обеспеченности $P = 1\%$ к другим;

r - коэффициент регулирования паводков водохранилищами и прудами.

Коэффициент склоновой трансформации паводков k'_0 - составляющая в уравнении (2) максимального модуля $q'_{1\%}$. Он рассчитан по данным 96 водосборов в пределах Карпато-Подольского региона.

Запишем (2) в развернутом виде (при $P = 1\%$ и $r = 1,0$), а именно:

$$q_{1\%} = q'_{1\%} k_F = k'_0 Y_{1\%} k_F. \quad (4)$$

Если, в первом приближении, $k_F = 1,0$, то определение k_0 упрощается, а (4) принимает вид:

$$q'_{1\%} = k_0 Y_{1\%}. \quad (5)$$

Исходя из (5) для всех водосборов:

$$k_0 = \frac{q_{1\%}}{Y_{1\%}}. \quad (6)$$

Но:

$$q_{1\%} = k'_0 Y_{1\%} k_F. \quad (7)$$

Для определения k_F построений зависимость $\frac{q_{1\%}}{Y_{1\%}} = f(F)$ (рис. 2).

Аппроксимировано:

$$k_0 = k'_0 e^{-0.61 \lg(F+1)}, \quad r = 0,61, \quad (8)$$

откуда

$$k_F = \frac{k_0}{k'_0} = e^{-0.61 \lg(F+1)}. \quad (9)$$

Теперь, исходя из (7), и используя уравнение (9) для всех водосборов вычислено k'_0 , как

$$k'_0 = \frac{q_{1\%}}{Y_{1\%}} / k_F. \quad (10)$$

Величины k'_0 изменяются в широком диапазоне - от 0,009 до 0,074 и почти не зависят от высотного положения водосборов и их залесенности. Взаимные коэффициенты корреляции между k'_0 , с одной стороны, и высотой водосборов Нср и их залесенность Фл, с другой, незначительны. Поэтому величину k'_0 районировано с помощью всего комплекса статистических параметров временных рядов максимального расхода и максимального слоя стока.

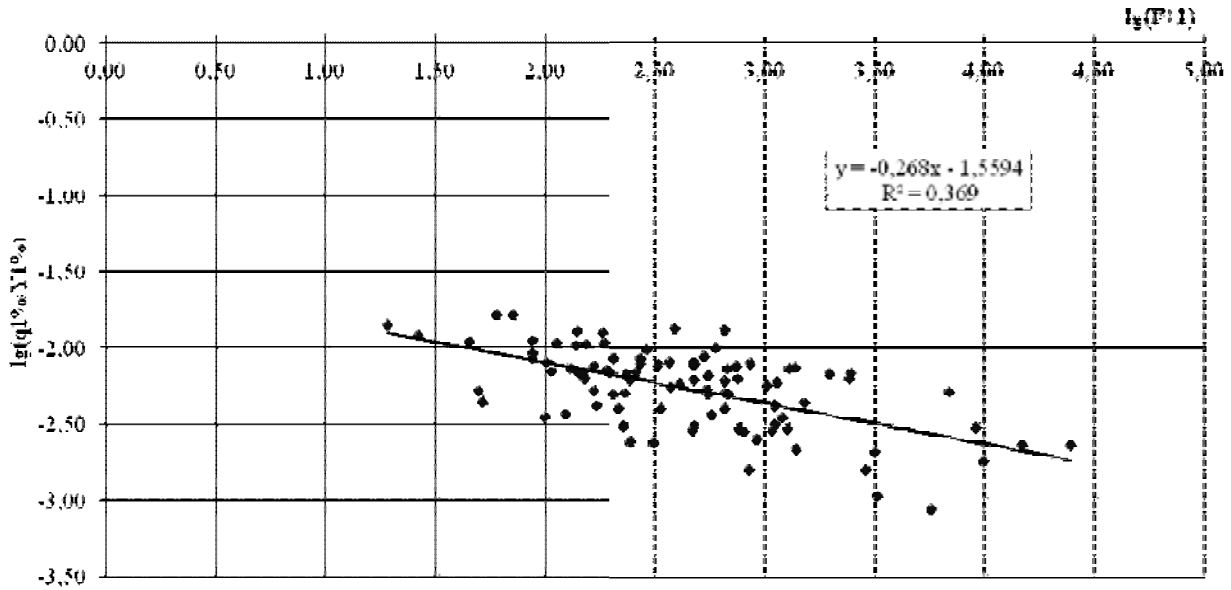


Рис. 2. Зависимость коэффициентов склоновой трансформации паводка от площади водосборов.

Пространственное обобщение $Y_{1\%}$ осуществлено с учетом высотного положения водосборов H_{cp} и аппроксимируется уравнением:

$$Y_{\%} = 0,195(H_{cp} - 300) + 79,8; \quad r = 0,66 \quad (11)$$

Коэффициент влияния высотного положения водосборов на расчетные слои стока $Y_{1\%}$:

$$k_H = 1 + 2,44 \cdot 10^{-3}(H_{cp} - 300) \quad (12)$$

С целью исследования влияния залесенности водосборов на $Y_{1\%}$, все данные по слоям стока, обеспеченность $P = 1\%$ были приведены к условной высоты $H_{cp} = 300$ м, причем

$$(Y_{1\%})_{H=300} = Y_{1\%} / k_H \quad (13)$$

где $(Y_{1\%})_{H=300}$ - слои паводкового стока $Y_{1\%}$, приведены в условной высоты $H_{cp} = 300$ м.

В дальнейшем $(Y_{1\%})_{H=300}$ поставлены в зависимость от залесенности водосборов Фл. Оказалось, что она является незначимой.

Как уже отмечалось, редуцированный коэффициент k_F , входящий в базовое уравнение (2), в интегральном виде учитывает эффекты трансформации паводковых волн под влиянием продолжительности руслового добега и русло-пойменного регулирования

Исходя из структуры обратным путем в расчетной схеме был установлен k_F , причем:

$$k_F = \frac{k_0}{k'_0} = f(F), \quad (14)$$

где $k_0 = \frac{q_{1\%}}{Y_{1\%}}$ - коэффициент склоновой трансформации паводков при условии, что в (2) $k_F = 1,0$. В дальнейшем k_F были обобщены в зависимости от размера водосборов (2) и описаны уравнением:

$$k_F = e^{-0,611 \lg(F+1)}. \quad (15)$$

Верхний предел величины k_F - единица (при $F = 0$), - при увеличении размеров водосбора он убывает.

Расчетные характеристики дождевых паводков в рассматриваемом регионе относятся к опорной обеспеченности $P = 1\%$. С целью перехода к другим обеспеченностям

печенностям при определении максимальных модулей паводкового стока в методике предусмотрены коэффициенты λ_p .

$$\lambda_p = \frac{q_{p\%}}{q_{1\%}} \quad (16)$$

где $q_{1\%}$ - максимальный модуль паводкового стока при $P = 1\%$.

По описанной схеме вычислено максимальные модули паводкового стока обеспеченностью $P = 1\%$ для всех 96 речных водосборов.

Среднее отклонение расчетных модулей стока соответствует точности исходных величин и находится на уровне $\pm 14\%$. Это в полной мере соответствует точности определения по статистической обработке временных рядов максимальных расходов воды дождевых паводков рек Карпато-Подолья ($\sigma_{q_{1\%}} = 17.0\%$).

Предложенная методика рекомендуется для практического использования при расчете характеристик максимального стока дождевых паводков незначительных рек различной обеспеченности в пределах Карпато-Подольского региона.

Список литературы

1. Бефани А.Н. Теория формирования дождевых паводков и методы их расчета / А.Н.Бефани // Международный симпозиум по паводкам и их расчетам.-1969.-Т.1.-с.44-58.
2. Гопченко Е.Д. Расчет максимального стока дождевых паводков рек Закарпатья / Е.Д.Гопченко, М.Е.Романчук, А.С.Харитоновна // Вестник Одесского государственного экологического университета. В-2010. - №.10.-С.181-186.
3. Рождественский, А.В. Современная проблема инженерных гидрологических расчетов по обобщению гидрологической информации в России и пути ее решения / АВ Рождественский, А.Г. Лобанова // Метеорология и гидрология.-2011. - №7.-С. 81-94.
4. Свод правил по проектированию и строительству. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик.-М.: Госстрой России, 2003.-73с.
5. Строительные нормы и правила. СНиП 2.01.14-83.Определение расчетных гидрологических характеристик / Госстрой СССР. - М.: Стройиздат, 1985. - 36с.
6. Явкин В.Г. Детерминированная модель дождевых паводков в горах / В.Г. Явкин // Материалы V Всесоюз. Гидрологич. Съезд. Т.б. "Теория и методология гидрологических расчетов". - Л.: Гирометеоиздат, 1989. - С. 289-293.
7. Явкин В.Г. Оценка модулей максимального стока в бассейнах подольских приток Днестра удлиненными рядами наблюдений / В.Г.Явкин, А.А.Мельник // Гидрология, гидрохимия и гидроэкология: Научн.сборник, - Т.3 (24). - К.: БГЛ «Обрий», 2011. - С.50-58 (на украинском языке)
8. Evaluation of National Guides on Methods of Hydrological Computations. / JW van der Made (ed.). - Paris, UNESCO, IHP-III Project 2.1, 1989, 48 p.
9. Svensson C. Trends in flood and low flow hydrological time series / C.Svensson, ZWKundzewicz, T.Maurer WMO / TD-No. 1241,2004. - 44 pp.

ЧАСТОТА СОЧЕТАНИЯ СКОЛИОТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПОЗВОНОЧНИКА У ДЕТЕЙ С АНОМАЛИЕЙ КИАРИ 1

Глаголев Н.В.,

кандидат медицинских наук

Козлитина Т.Н.,

кандидат медицинских наук

БУЗ Областная детская клиническая больница №2 (г. Воронеж)

Номер специальности 14.01.18 nglag@mail.ru

Аннотация. Авторами проанализированы все случаи обращения детей в ОДКБ №2 к ортопеду с диагнозом сколиоз и к нейрохирургу с диагнозом аномалия Киари I (AK1) за 10 летний период с 2004 по 2013 годы. Определена частота сочетания аномалии Киари I со сколиозом у детей. У пациентов с AK1 сколиоз определялся в 51,5% случаев, у больных со сколиозом AK1 был установлен у 63,9% детей.

Ключевые слова: аномалия Киари I, сколиоз, частота сочетания.

THE FREQUENCY OF THE COMBINATION OF THE SCOLIOSIS IN CHILDREN WITH CHIARI MALFORMATION TYPY 1

N.V. Glagolev, T.N. Kozlitina

Regional Children 's Clinical Hospital №2", Voronezh, Russia

Abstract. The authors analyzed all cases of treatment of children in the Regional Children 's Clinical Hospital №2, Voronezh, Russia with the orthopedic diagnosis scoliosis and a neurosurgical diagnosis Chiari malformation type 1 (CM-1) for the 10 year period from 2004 to 2013. Frequency of the combination CM-1 with scoliosis in children was identified. The scoliosis in patients with AK1 was determined in 51.5% of cases. Diagnosis of CM-1 was detected in 63.9% of children with scoliosis.

Keywords: Chiari I anomaly, scoliosis, frequency of the combination.

Актуальность. Опыт хирургического лечения аномалии Киари I (AK1) развивается на протяжении последних нескольких десятилетий, начиная с проведения первой декомпрессивной трепанации задней черепной ямки в 40-х годах прошлого века. Не смотря на то, что этот порок развития краниовертебрального перехода (КВП) впервые описан в 1891, истинная частота развития AK1 неизвестна [3]. Распространенность сколиоза у детей составляет от 3,4 до 15%. и отмечается тенденция к ее увеличению. Прогрессирование до тяжелых степеней, по данным разных авторов, встречается в 10–20% случаев [2]. Известно, что AK1 часто встречается в сочетании с патологией позвоночника и спинного мозга, таких как сирингомиелия и сколиоз [4, 7]. Однако исследований по распространенности сочетания вариантов AK1 и сколиоза у детей нет.

Цель работы: определить частоту сочетания аномалии Киари I со сколиозом у детей.

Материалы и методы.

Частоту сочетания аномалии Киари I и сколиоза у детей определяли с помощью анализа всех случаев обращения детей в ОДКБ №2 к ортопеду с диагнозом сколиоз и к нейрохирургу с диагнозом AK1 за 10 летний период с 2004 по 2013 годы. Исследовали клиническую картину, данные рентгенографии позвоночника в прямой и боковой проекции в положении больного стоя. Данные КТ и МРТ головного и спинного мозга. Компьютерную ангиографию сосудов головы и шеи. Из исследования исключены пациенты с врожденным сколиозом, деформациями позвоночника на фоне опухолей, нейрофиброматоза,

миелодисплазии, фиксированного спинного мозга и травматических повреждений. Больные с опухолями головного мозга, гидроцефалией, синдромальным краниостенозом и мозговыми грыжами также были исключены из текущего анализа. Диагноз аномалии Киари I устанавливали детям при уровне опущения миндалин мозжечка ниже 3 мм от края большого затылочного отверстия. Диагноз сколиоз устанавливали пациентам с углом искривления позвоночника, начиная от 8 градусов по Коббу.

Результаты.

В результате отбора в исследование были включены 202 пациента в возрасте от 3 до 18 лет (средний возраст 12,1 лет). Мальчиков было 100 (49,5%) девочек – 102 (50,5%). Двадцать детей (9,9%) было в возрасте от двух до шести лет (мальчиков – восемь, девочек -12). В возрасте от семи до 11 лет – 52 (35,7%) ребенка (девочек - 19, мальчиков -33), в возрасте от 12 до 15 лет – 96 (47,5%) пациентов (девочек - 55, мальчиков - 41), в возрасте от 16 до 18 лет – было 34 (16,8%) подростка (девочек - 19 мальчиков - 15).

На прием к ортопеду обратилось 73 (36,1%) ребенка с диагнозом сколиоз. Основной жалобой у этих детей была деформация позвоночника. 129 (63,9%) детей обратились к нейрохирургу с установленным или поставленным при дальнейшем обследовании диагнозом аномалия Киари I. Из них 116 (89,9%) пациентов первично обратились с жалобами на головную боль разной степени выраженности, у 32 (27,6%) из 116 больных были выявлены очаговые симптомы.

Сочетание АК1 и сколиоза было установлено у 104 (51,5%) детей – 1 группа. У 45 (22,3%) пациентов с АК1 сколиоза не было – 2 группа. Сколиоз без АК1 отмечался у 53 (26,2%) больных – 3 группа.

В первой группе возрастной и половой состав пациентов распределился следующим образом: было 12 (11,5%) детей в возрасте от двух до шести лет, мальчиков – пять, девочек - семь. В возрасте от семи до 11 лет – 32 (30,7%) ребенка (девочек - 20, мальчиков - 11), в возрасте от 12 до 15 лет – 42 (40,4%) пациента (девочек 26, мальчиков 16), в возрасте от 16 до 18 лет – было 18 (17,4%) пациента (девочек - восемь, мальчиков - 10).

Во второй группе распределение возрастного и полового состава пациентов было следующим: было пять (11,1%) детей в возрасте от двух до шести лет (все мальчики - 100%). В возрасте от семи до 11 лет – 16 (35,6%) детей (девочек - 6, мальчиков - 10), в возрасте от 12 до 15 лет – 18 (40%) пациентов (девочек - 3, мальчиков - 15), в возрасте от 16 до 18 лет – было шесть (13,3%) больных (девочек - 4, мальчиков - 1).

В третьей группе среди пациентов было следующее распределение по возрасту и полу: трое (5,6%) детей было в возрасте от двух до шести лет (мальчиков – один, девочек – две). В возрасте от семи до 11 лет – пять (9,4%) пациентов (девочек - 2, мальчиков - 3), в возрасте от 12 до 15 лет – 36 (67,9%) пациентов (девочек 26, мальчиков 10), в возрасте от 16 до 18 лет – было 9 (16,9%) пациентов (девочек - пять, мальчиков - 4).

Следовательно, в группах детей с изолированной АК преобладали мальчики, а в группах с изолированным сколиозом и в сочетании с АК преобладали девочки. Разница по полу была более отчетлива в возрасте от 12 до 15 лет.

Выраженная головная боль (более 5 баллов по ВАШ) отмечалась у 60 (57,7%) детей в 1 группе, 19 (43,2%) - во второй, 28 (51,8%) - в третьей группе. Почти у каждого второго ребенка, в равной степени по всем группам, отмечалась головная боль разной интенсивности выше уровня 5 баллов по ВАШ. Очаговые симптомы (мозжечковые расстройства, глазодвигательные нарушения, симптомы с каудальной группы черепно-мозговых нервов) встречались в первой группе у 25 (24%) детей, во второй - у 16 (36,4%), в третьей - только у одного (2%) ребенка.

В первой группе миндалины мозжечка располагались ниже уровня БЗО до С1 у 47 (45,2%) детей, на уровне С1 - у 42 (40,4%), ниже С1 - у 15 (14,4%) больных. Во второй группе: у 15 (34,1%), 23 (52,3%) и 6 (13,6%) пациентов соответственно. Существенной разницы между расположением миндалин мозжечка по отношению к БЗО и С1 у пациентов с АК1 с наличием или отсутствием сколиоза не выявлено. Можно отметить, что в группе изолированной АК1 чаще миндалины располагались на уровне С1.

Сирингомиелия среди больных, включенных в настоящее исследование, отмечалась в 13 (6,4%) случаях. В первой группе больных сирингомиелия была у 10 (9,6%) пациентов. Во второй группе пациентов с изолированной АК1 сирингомиелия была у трех (6,8%) пациентов. Сирингомиелия чаще присутствовала у пациентов с АК1 в сочетании со сколиозом и в половине случаев располагалась в шейно-грудном отделе позвоночника. В группе детей с изолированным сколиозом сирингомиелии не отмечалось.

Спазм позвоночной артерии в четвертом сегменте отмечался у 59 (56,7%) пациентов первой группы по данным КТАГ. Во второй группе - у 21 (47,7%) ребенка. В третьей - у 11 (20,4%) больных. Расширение венозных сплетений КВП было у 61 (58,7%), 14 (25,9%), 19 (43,2%) больных соответственно. Сосудистые нарушения на уровне краниовертебрального перехода у пациентов с изолированной АК и в сочетании со сколиозом встречались значительно чаще, чем в группе пациентов с изолированным сколиозом.

Всего больных со сколиозом было 157 (77,2%) из них 104 (66,2%) в сочетании с АК1. Правосторонних сколиозов было 137 (87,3%), левосторонних - 20 (12,7%). Следует отметить, что 14 (70%) левосторонних деформаций было при сочетании АК1 и сколиоза.

Хирургическое лечение было проведено 114 (56,4%) больным, консервативное - 88 (43,6%). Среди хирургических способов лечения было проведено 83 (72,8%) декомпрессивных трепанаций задней черепной ямки (ДЗЧЯ), из них у 56 (67,5%) больных с сопутствующим сколиозом. Было осуществлено 43 (37,7%) коррекции сколиоза из них 11 (25,6%) после ДЗЧЯ. Тридцати двум детям (74,4%) поведена хирургическая коррекция сколиоза без предварительной ДЗЧЯ, у 27 из них АК1 отсутствовала, у 5 характеризовалась бессимптомным течением. ДЗЧЯ была эффективна в отношении неврологической симптоматики: из 83 у 78 (94%) пациентов купирована головная боль. Из 56 (67,5%) детей с АК1 и сколиозом, которым была проведена ДЗЧЯ, у 24 (42,8%) наступило улучшение, у 18 (32,1%) - стабилизация, у 14 (25%) - прогрессия, которая в 11 (78,6%) случаях потребовала корригирующей хирургии.

Обсуждение.

В литературе имеются противоречивые данные о сочетании АК1 и сколиоза. По одним данным у 28% пациентов с изолированной АК1 и у 49% с АК1 в сочетании с сирингомиелией был выявлен сколиоз [5]. Есть сообщения о распространенности сколиоза у пациентов с АК1 без сирингомиелии в пределах 8% - 30% [5, 6]. Однако, есть сообщения авторов, которые на основании проведенного ими проспективного исследования утверждают, что только у трех из 140 обследованных пациентов, перед хирургической коррекцией сколиоза, была выявлена неврологическая патология в виде АК1 и сирингомиелии. В связи с чем, они считают не обязательным проведения МРТ скрининга перед оперативным лечением сколиоза [8].

Наши данные показывают, что сколиоз выявляется у детей с АК1 в 51,5% случаев, а сирингомиелия в 8,7%. При проведении МРТ у детей со сколиозом АК1 определяется у 63,9% детей.

Некоторые авторы предполагают, что опущение миндалин является базовой этиологией сколиоза у больных с АК1. Наши данные это предположение не подтверждают.

Однако, сосудистые нарушения, возникающие при АК1, описанные нами в предыдущих исследованиях, имеют место и у пациентов с АК1 в сочетании со сколиозом [1]. Нами отмечен положительный эффект декомпрессивной трепанации ЗЧЯ, как на клинические проявления аномалии Киари I, так и на течение сколиотической деформации позвоночника у детей разных возрастных групп. Следует отметить, что достоверно сколиоз регрессирует у пациентов младше 10 лет и с углом деформации менее 30 градусов по Коббу.

Выводы: Сколиоз выявляется у детей с АК1 в 51,5%, сирингомиелия у таких больных встречается в 8,7%. При проведении МРТ у детей со сколиозом АК1 определяется у 63,9% детей. Необходима настороженность нейрохирургов и ортопедов в вопросе своевременной диагностики и лечения смежных заболеваний, таких как АК1 и сколиоз.

Список литературы

1. Глаголев, Н.В. Церебральные сосудистые нарушения при аномалии Арнольда-Киари I у детей / Н.В. Глаголев, Т.Н. Козлитина, И.И. Шоломов и соавт. // Саратовск. науч. -мед.журн. - 2012. – Т. 8, №1. - С – 88-91.
2. Филиппов, И.К. Методики исследования костной ткани позвоночника у детей со сколиозом. / И.К. Филиппов, Ю.И. Поздникин, В.И. Садофьева и др. // Материалы конгресса «Человек и его здоровье»: СПб, 1999. – С. 169–170.
3. Hankinson, T.C. Chiari malformations, syringohydromyelia and scoliosis. / T.C. Hankinson, P.Jr. Klimo, N.A. Feldstein, R.C. Anderson, D. Brockmeyer // Neurosurg. – 2007. – Vol.18. – P.549–568.
4. Loukas, M. Hans Chiari (1851–1916). / M. Loukas, N. Noordeh, M.M. Shoja, J. Pugh, W.J. Oakes, R.S. Tubbs. - Childs Nerv Syst. – 2008. – Vol.24. – P.407–409.
5. Milhorat, T.H. Chiari I malformation redefined: clinical and radiographic findings for 364 symptomatic patients / T.H. Milhorat, M.W. Chou, E.M. Trinidad, R.W. Kula, M. Mandell, C. Wolpert // Neurosurgery. – 1999. – Vol.44. – P. 1005–1017.
6. Strahle, J. Chiari malformation Type I and syrinx in children undergoing magnetic resonance imaging. Clinical article. / J. Strahle, K.M. Muraszko, J. Kapurch, J.R. Bapuraj, H.J. Garton, C.O. Maher // J Neurosurg Pediatr. – 2011.- Vol.8. – P. 205–213.
7. Tubbs, R.S. Institutional experience with 500 cases of surgically treated pediatric Chiari malformation Type I. Clinical article. / R.S. Tubbs, J. Beckman, R.P. Naftel, J.J. Chern, J.C. Wellons, C.J. Rozzelle, et al. // J Neurosurg Pediatr. – 2011. – Vol.7. – P. 248–256.
8. Winter, R.B. Magnetic resonance imaging evaluation of the adolescent patient with idiopathic scoliosis before spinal instrumentation and fusion. / R.B. Winter, J.E. Lonstein, K.B. Heithoff, J.A. Kirkham // Spine. – 1997. – Vol.8. – P. 855-858.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВРЕМЕННОЙ ВНУТРИПРОСВЕТНОЙ БАЛОННОЙ ОККЛЮЗИИ ПРИ ПОВТОРНЫХ РЕКОНСТРУКЦИЯХ МАГИСТРАЛЬНЫХ АРТЕРИЙ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

Староверов И.Н.,

кандидат медицинских наук, заведующий кафедрой хирургии
Института последипломного образования, доцент,
istaroverov@mail.ru

Лончакова О.М.,

кандидат медицинских наук, ассистент кафедры хирургии
Института последипломного образования ГБОУ ВПО
«Ярославская государственная медицинская академия» Минздрава России
omloncha@mail.ru

Аннотация. Проанализированы результаты лечения 365-ти пациентов, которым потребовалось выполнение повторных реконструктивных операций на магистральных артериях нижних конечностей. Выявлено, что использование метода временной внутрисосудистой баллонной окклюзии (ВВБО) - один из факторов, влияющих на частоту облитерирующих осложнений повторных реконструктивных операций на магистральных артериях нижних конечностей.

Ключевые слова: рестеноз, временная внутрисосудистая баллонная окклюзия.

THE USE OF A METHOD OF TIME ENDOLUMINAL BALLOON OCCLUSION AFTER REOPERATIONS ON MAIN ARTERIES OF LOWER LIMBS

I. Staroverov, .O. Lonchakova

Yaroslavl State Medical Academy

Abstract. The results of a survey of 365 patients who required the re-reconstructive operations on the main arteries of the lower limbs. The use of a method of time endoluminal balloon occlusion (VVBO) one of the factors, influencing on obliterating complications of reoperations on the arteries of lower limbs.

Key words: restenosis, time endoluminal balloon occlusion.

Актуальность. При увеличении количества выполняемых сосудистых реконструкций возрастает и число больных, нуждающихся в повторных операциях в связи с осложнениями раннего послеоперационного периода или в отдаленные сроки после хирургической реваскуляризации конечностей [1, 2, 3, 4]. Среди всех осложнений послеоперационного периода на долю повторной окклюзии приходится 79,2-84,6% в зависимости от сроков наблюдения за больными [5, 6, 7]. Несмотря на большой объем публикаций по данной проблеме, недостаточно изучена динамика развития пролиферативных процессов в зависимости от вида пластики сосуда в

формировании рестеноза. До сих пор не исследованы основные закономерности развития пролиферативных изменений в зоне дезоблитерации, не определены локальные факторы, влияющие на этот процесс.

В связи с этим целью нашего исследования явилось изучение влияния классического способа мобилизации при выполнении повторных операций на артериях нижних конечностей на частоту облитерирующих осложнений в ближайшем и отдаленном периодах.

Материал и методы. За период с 1991 по 2010 год на базе отделения сосудистой хирургии ГБУЗ ЯО ОКБ выполнены операции по поводу хроничес-

кой ишемии, обусловленной атеросклерозом артерий нижних конечностей 1682 пациентам. Из группы первично оперированных больных 365-ти пациентам выполнены повторные реваскуляризирующие вмешательства по поводу облитерирующих осложнений в отдаленном периоде (от 3-х месяцев до 12 лет). Эта группа пациентов явилась основной в нашем исследовании. Средний возраст повторно оперированных составил $64,1 \pm 7,5$ года. Совокупная длительность заболевания на момент госпитализации достигала 20 лет, а в среднем составила $5,5 \pm 0,8$ лет. Основной причиной повторных вмешательств явилось нарушение проходимости в аорто-подвздошно-бедренном сегменте (197 случаев), несколько реже (190 случаев) в инфраингвинальной зоне. Структура выполненных оперативных вмешательств представлена в таблицах 1,2.

Наиболее многочисленную группу реконструкций аорто-бедренной зоны (78 операций) составили тромбэктомии из шунтов, сопровождающиеся, как правило, пластикой дистального анастомоза. Наиболее технически сложной оказалась группа операций рещунтирования (34 вмешательства). При невозможности выполнения той и другой методики мы ставили показания к экстраанатомическому шунтированию, которое было выполнено у 37 пациентов. При отсутствии возможности выполнения прямой реваскуляризации мы вынуждены были прибегать к операциям, направленным на стимуляцию коллатерального кровообращения (ПСЭК, РОТ). При повторной окклюзии сосудов в инфраингвинальной зоне на структуру оперативных пособий во многом повлияло преобладание «периферического типа» поражения артериального русла нижних конечностей.

Во время большинства повторных вмешательств мы старались минимизировать травму и так уже поврежденной адвентиции. Для этого использовали метод временной внутрипросветной баллонной окклюзии (ВВБО) с помощью катетеров Фогарти.

Сущность метода заключалась в следующем. После осуществления послойного доступа к зоне вмешательства без мобилизации заинтересованных сосудов и наложения сосудистых зажимов осуществ-

лялось продольное вскрытие острым путем стенки сосуда вместе с окружающими ее тканями. После этого на фоне пальцевого прижатия приносящих и относящих артерий в их устья заводились катетеры Фогарти и производилось раздутие баллона, который окклюзировал просвет сосуда. Тем самым достигался гемостаз. После этого артериотомическая рана расширялась до необходимых для выполнения реконструкции размеров. Основной этап операции (ЭАЭ, формирование анастомоза) осуществлялся в условиях «сухого поля». Перед завершением наложения последних стежков шва катетеры сдувались и удалялись. Завершение шва происходило при пальцевом прижатии артерий. Для временной окклюзии использовались как однопросветные катетеры Фогарти, так и двухпросветные. Преимуществом последних была возможность во время прекращения кровотока по сосуду вводить в его просвет различные лекарственные препараты (антикоагулянты, дезагреганты, спазмолитики, растворы и т.д.). Частота использования таких баллонов составила 41% по сравнению с однопросветными.

Для оценки влияния способа мобилизации сосудов во время повторной операции на частоту облитерирующих осложнений в ближайшем и отдаленном периодах мы разделили больных на две группы: в первой использовались катетеры Fogarti для временной окклюзии просветов сосудов при выполнении основного этапа операции 38,6% (128/332), а во второй - проводилась тщательная мобилизация артерии с последующим наложением зажимов 61,4% (204/332).

Статистически достоверных различий по основным характеристикам в сравниваемых группах не выявлено, что позволяло сделать заключение о сопоставимости полученных в дальнейшем результатов.

Для исключения формирования рестеноза, а также для определения зависимости между техникой оперативного вмешательства и частотой развития осложнений всем пациентам в ближайшем и отдаленном послеоперационном периоде выполнено УЗДС. В раннем послеоперационном периоде и в сроки до 6 месяцев исследование выполнено во всех 332 слу-

Таблица 1

Оперативные вмешательства у больных основной группы при различных облитерирующих осложнениях в аорто-бедренной зоне (n=197)

Вид облитерирующего осложнения	Вид операции	ВСЕГО	
Тромбоз или посттромботическая окклюзия бифуркационного протеза (включая тромбоз проксим. ложной аневризмы)	Ре АББШ	8	36
	Тромбэктомия+пластика анастомозов	12	
	Экстраанатомическое шунтирование	7	
	Попытка тромбэктомии + непрямая реваскуляризация	9	
Тромбоз или посттромботическая окклюзия бранши бифуркационного протеза	Тромбэктомия + пластика	32	48
	Перекрестное протезо-бедренное шунтирование	6	
	Непрямая реваскуляризация	10	
Тромбоз или посттромботическая окклюзия линейного аорто- или подвздошно-бедренного протеза	Ре ПБШ	5	37
	Тромбэктомия + пластика	16	
	Перекрестное подвздошно- или бедренно-бедренное шунтирование	4	
	Попытка тромбэктомии + непрямая реваскуляризация	12	
Тромбоз или посттромботическая окклюзия инфицированного аорто-бедренного протеза	Резекция бранши + перекрестный венозный шунт	3	12
	Удаление протеза + подключично-бедренный шунт	4	
	Удаление протеза + подключично-бидебранный шунт	3	
	Укутывание сальником + тромбэктомия с пластикой анастомоза	2	
Тромбоз или посттромботическая окклюзия дезоблитерированной аорты	Подключично-бедренный шунт	2	10
	Подключично-бидебранный шунт	1	
	АББШ	5	
	Непрямая реваскуляризация	2	
Тромбоз или посттромботическая окклюзия дезоблитерированной подвздошной артерии	АББШ	5	25
	Линейное АБШ	8	
	Повторная дезоблитерация	3	
	Непрямая реваскуляризация	9	
Тромбоз или посттромботическая окклюзия парапротезной ложной аневризмы	Тромб-ЭАЭ из протеза + реконструкция зоны анастомоза	16	29
	Перекрестный шунт	5	
	Подмышечно-бедренный шунт	2	
	Непрямая реваскуляризация	6	
ВСЕГО		197	197

**Повторные оперативные вмешательства в инфраингвинальной
зоне у больных основной группы (n=206)**

Вид облитерирующего осложнения	Вид операции	ВСЕГО	
Тромбоз или посттромботическая протяженная окклюзия дезоблитерированной бедренной артерии	Шунтирование аутовеной	13	51
	Шунтирование протезом	6	
	Непрямая реваскуляризация	32	
Тромбоз или посттромботическая окклюзия аутовенозного шунта	Петлевая дезоблитерация ПБА	10	44
	Шунтирование протезом	8	
	Непрямая реваскуляризация	26	
Тромбоз или посттромботическая протяженная окклюзия протеза на бедре	Шунтирование аутовеной	5	13
	Петлевая дезоблитерация ПБА	2	
	Непрямая реваскуляризация	6	
Тромбоз или посттромботическая протяженная окклюзия инфицированного протеза на бедре	Снятие протеза + реконструкция аутовеной	6	11
	Снятие протеза + непрямая реваскуляризация	5	
Тромбоз или посттромботическая протяженная окклюзия в зоне реконструкций на уровне голени и стопы	Бедренно-подколенно-берцовый «скачущий» шунт	2	23
	Артериализация вен голени и стопы	7	
	ЭАЭ из берцовых артерий	3	
	Подколенно-плантарное шунтирование	2	
	Непрямая реваскуляризация	9	
Гемодинамически значимый рестеноз (>70%) или короткая окклюзия	ЭАЭ+пластика	22	24
	Непрямая реваскуляризация	2	
Гемодинамически значимый рестеноз или реокклюзия, сопровождающиеся поражением путей притока	Проксимальная реконструкция + повторное шунтирование	4	40
	Проксимальная реконструкция + ЭАЭ зоны рестеноза с пластикой	11	
	Резекция ложной аневризмы с репротезированием и пластикой	18	
	Непрямая реваскуляризация	7	
ВСЕГО		206	206

чаях, а в сроки через от 1 год до 5 лет в 194 случаях (58,4%).

УЗДС осуществляли на ультразвуковой системе «Acuson Sequoia 512», Siemens и аппарате «Hitachi Hi Vision Avius» фирмы Hitachi (Япония) с конвексным датчиком для аорты 4-6 МГц и линейным датчиком 12 МГц. При проведении исследования в В-режиме нами проводился ряд количественных оценок, которые включали измерение внутреннего диаметра сосуда, площади поперечного сечения сосуда, степени стеноза сосуда и визуализацию тромботических масс в просвете.

Результаты и обсуждение. Проанализирована частота развития тромботических осложнений и формирования значимого стеноза в зависимости от объема наружной механической травмы сосуда во время операции (табл. 3).

Из представленной таблицы видно, что ни по одному из критериев не получено статистически достоверной разницы в сравниваемых группах.

Однако в группе пациентов, где не использовался катетер Fogarti, имеется большее количество окклюзирующих тромбов и значимых стенозов, происходящих, по нашему мнению, за счет увеличения толщины стенки в воспринимающем русле, связанного с репаративными процессами в адвентиции и меди в ответ на повреждение. Этот факт является важным неблагоприятным прогностическим призна-

ком, поскольку увеличение ригидности сосудистой стенки делает ее более восприимчивой к колебаниям эластичной ткани протеза, стимулирующим репаративные процессы в зоне контакта.

Анализ отдаленных результатов показал, что использование метода ВВБО во время повторной операции достоверно не влияет на количество тромботических осложнений, а вот гемодинамически значимый стеноз достоверно чаще проявлял себя в группе больных, которым не использовался метод ВВБО, по нашему мнению, за счет увеличения толщины стенки в воспринимающем русле, связанного с репаративными процессами в адвентиции и меди в ответ на повреждение (табл. 4).

Считаем, что сформировавшаяся со временем ригидная сосудистая стенка становится более восприимчивой к колебаниям растягивающейся ткани синтетического протеза, стимулирующего репаративные процессы в зоне контакта.

Таким образом, различная тактика, используемая при мобилизации стенозированного анастомоза, привела к следующим результатам в отдаленном периоде после операции (рис. 1).

При проведении частотного анализа достоверных отличий по частоте «неудовлетворительных» результатов между двумя подгруппами не получено ни в один из периодов.

Таблица 3

Частота облитерирующих осложнений после повторной реконструкций в зависимости от использования ВВБО в ближайшем периоде (n=332)

Признак	Использование метода ВВБО (n=128)		Классический доступ (n=204)		χ^2 ; p
	присутствует	отсутствует	присутствует	отсутствует	
Гемодинамически значимый рестеноз	2(1,6%)	126	5(2,5%)	199	0,3; 0,6
Пристеночные тромбы	11 (8,6%)	117	23(11,3%)	181	0,6; 0,4
Окклюзирующие тромбы	16(12,5%)	112	34(16,7%)	170	1,1; 0,3

Частота облитерирующих осложнений после повторной реконструкций в зависимости от использования ВВБО в отдаленном периоде (n=194)

Признак	Отдаленный период (1-5 лет)		χ; P
	Частота встречаемости при классическом доступе (n=108)	Частота встречаемости при использовании ВВБО (n=86)	
Гемодинамически значимый рестеноз	17 (15,7%)	5 (5,8%)	4,7; 0,03
Пристеночные тромбы	3 (2,8%)	2 (2,3%)	0,07; 0,8
Окклюзирующие тромбы	55 (50,9%)	33 (38,4%)	3,04; 0,08

Выводы. Использование метода ВВБО достоверно значимо не влияет на результат повторной операции как в ближайшем, так и в отдаленном периоде.

При этом метод достоверно снижает частоту гемодинамически значимых рестенозов в отдаленном послеоперационном периоде.

Список литературы

1. Гавриленко А.В., Лисицкий Д.А. Прогнозирование результатов реконструктивных операций на сосудах нижних конечностей. М.: Издательство «МНПИ», 2001. – 75с.
2. Покровский А.В., Зотиков А.Е. Повторные операции на аорто-бедренном сегменте. Клиническая ангиология. – М.: Медицина, 2004. – С. 153-167.
3. Кузнецов М.Р. Современное состояние проблемы реокклюзий после реконструктивных вмешательств на артериях таза и нижних конечностей у больных облитерирующим атеросклерозом // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2009. – Т.15, №4. – С. 145-151.
4. Bradbury Andrew W. Bypass versus Angioplasty in Severe Ischaemia of the Leg (BASIL) trial: A description of the severity and extent of disease using the Bollinger angiogram scoring method and the TransAtlantic Inter-Society Consensus II classification // Journal of Vascular Surgery. -2010.- Vol. 51 (Supplement S).- P. 32S-42S.
5. Затевахин И.И. Выбор объема и сроков санирующих вмешательств после сосудистой реконструкции у больных с хронической артериальной недостаточностью нижней конечности IV стадии // Хирургия. – 2005. - №12. – С. 12-17.
6. Покровский А.В. Можно ли предсказать исход реконструктивной операции у больных с ишемией нижних конечностей на основании дооперационных исследований? // Ангиология и сосудистая хирургия. – 2002. - №3. – С. 102-110.
7. Дудкин Б.П. Повторные операции у больных с атеросклеротическими окклюзиями артерий нижних конечностей и тяжелой ишемией // Ангиология и сосудистая хирургия (приложение). – 2001. -№3. – С. 54-55.

Требования к оформлению рукописей статей, направляемых для публикации в журнале



Для публикации научных работ в выпусках серий научно-практического журнала "Современная наука: актуальные проблемы теории и практики" принимаются статьи на русском языке. Статья должна соответствовать научным требованиям и общему направлению серии журнала, быть интересной достаточно широкому кругу российской и зарубежной научной общественности.

Материал, предлагаемый для публикации, должен быть оригинальным, не опубликованным ранее в других печатных изданиях, написан в контексте современной научной литературы, и содержать очевидный элемент создания нового знания. Представленные статьи проходят проверку в программе "Антиплагиат".

За точность воспроизведения дат, имен, цитат, формул, цифр несет ответственность автор.

Редакционная коллегия оставляет за собой право на редактирование статей без изменения научного содержания авторского варианта.

Научно-практический журнал "Современная наука: актуальные проблемы теории и практики" проводит независимое (внутреннее) рецензирование.

Правила оформления текста.

- ◆ Текст статьи набирается через 1,5 интервала в текстовом редакторе Word для Windows с расширением ".doc", или ".rtf", шрифт 14 Times New Roman.
- ◆ Перед заглавием статьи указывается шифр согласно универсальной десятичной классификации (УДК).
- ◆ Рисунки и таблицы в статью не вставляются, а даются отдельными файлами.
- ◆ Единицы измерения в статье следует выражать в Международной системе единиц (СИ).
- ◆ Все таблицы в тексте должны иметь названия и сквозную нумерацию. Сокращения слов в таблицах не допускается.
- ◆ Литературные источники, использованные в статье, должны быть представлены общим списком в ее конце. Ссылки на упомянутую литературу в тексте обязательны и даются в квадратных скобках. Нумерация источников идет в последовательности упоминания в тексте.
- ◆ Список литературы составляется в соответствии с ГОСТ 7.1–2003.
- ◆ Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Правила написания математических формул.

- ◆ В статье следует приводить лишь самые главные, итоговые формулы.
- ◆ Математические формулы нужно набирать, точно размещая знаки, цифры, буквы.
- ◆ Все использованные в формуле символы следует расшифровывать.

Правила оформления графики.

- ◆ Растровые форматы: рисунки и фотографии, сканируемые или подготовленные в Photoshop, Paintbrush, Corel Photopaint, должны иметь разрешение не менее 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.
- ◆ Векторные форматы: рисунки, выполненные в программе CorelDraw 5.0–11.0, должны иметь толщину линий не менее 0,2 мм, текст в них может быть набран шрифтом Times New Roman или Arial. Не рекомендуется конвертировать графику из CorelDraw в растровые форматы. Встроенные – 300 dpi, формата TIF, без LZW уплотнения, CMYK.

По вопросам публикации следует обращаться к шеф-редактору научно-практического журнала "Современная наука: актуальные проблемы теории и практики" (e-mail: redaktor@nauteh.ru).