

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И ПРИКЛАДНАЯ
ИНФОРМАТИКА
№ 3, 2015**

**SYSTEM ANALYSIS
AND APPLIED
INFORMATION SCIENCE
No 3, 2015**



**Международный
Научно-технический журнал**

Издается с декабря 2012 года

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Главный редактор

Федор Иванович Пантелеенко

Редакционная коллегия

В. Ф. Голиков (зам. главного редактора),
В. А. Богущ, Т. В. Борботько, Р. Венерстен (Швеция),
В. А. Ганэ, Н. Н. Гурский, Ю. М. Захарик, Э. Г. Лазаревич,
А. А. Лобаты, В. А. Мищенко, А. Патрин (Польша),
И. А. Сатиков, В. В. Старовойтов, П. П. Урбанович,
А. Н. Чичко, В. Б. Байбури (Россия),
Е. И. Никифорович (Украина)

**International
Science and Technique Journal**

Published since December, 2012

Founder

Belarusian National Technical
University

Editor-in-chief

Phyodor Panteleenko

Editorial board

V. Golikov (deputy editor-in-chief),
V. Bogush, T. Borbotko, P. Venersten (Sweden),
V. Ganeh, N. Gurskiy, J. Zaharik, E. Lazarevich,
A. Lobaty, V. Mishchenko, A. Patrin (Poland),
I. Satikov, V. Starovoytov, P. Urbanovich,
A. Chichko, V. Bayburin (Russia),
E. Nikiforovich (Ukraine)

Содержание

Contents

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Переварюха А. Ю.

Граничный кризис аттрактора в моделировании
причин деградации промысловых биоресурсов..... 4

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Лукашов С. И., Напрасников В. В., Богачук А. М.
Исследование робототехнической конструкции
с большими перемещениями на основе конечно-
элементного подхода..... 10

Имад Элзеин

Система обеспечения максимальной выходной мощ-
ности солнечных батарей 15

Опейко О. Ф.

Подчиненное управление объектом с параметриче-
ской неопределенностью 21

**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И ПРИНЯТИЕ
РЕШЕНИЙ**

Лешкевич В. В.

Расчет температурного поля и приведенного сопро-
тивления теплопередаче ограждающих конструк-
ций зданий с помощью метода конечных элементов 26

Золотарев С. А., Мирзаванд М. А.

Трехмерная реконструкция изображений методом
SART с минимизацией тотальной вариации..... 31

SYSTEM ANALYSIS

Perevarukha A.Y.

Boundary crisis of attractor in the simulation causes of
the degradation of commercial bioresources..... 4

MANAGEMENT OF TECHNICAL OBJECTS

Lukashov S. I., Naprasnikov V. V., Bogacuk A. M.
Research of the robotic design with large deflections
using finite element analysis 10

Imad Elzein

Maximum power point tracking system for photovoltaic
station 15

Opeiko O. F.

Cascade control for plant with parameter uncertainty ... 21

DATA PROCESSING AND DECISION-MAKING

Liashkevich V. V.

Calculation of the thermal field and the thermal resis-
tance of buildings envelopes using the finite element
method..... 26

Zolotarev S. A., Mirzavand M. A.

Three-dimensional vision reconstruction by SART
method with minimization of the total variation..... 31

Пузанов А. В.
Принцип пост-производственного проектирования гидроприводов 36

Сулим П. Е., Юденков В. С.
Использование программного обеспечения для спектрального анализа ризографической печати 42

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Сидоренко А. В., Жуковец Д. А.
Элементы дифференциального и линейного криптоанализа алгоритма шифрования с использованием динамического хаоса 48

Puzanov A. V.
Principle of post-production design of hydraulic actuators 36

Sulim P. E, Yudenkov V. S.
Software for spectral analysis rizoграф print 42

INFORMATION SECURITY

Sidorenko A. V., Zhukovets D. A.
Differential and linear cryptoanalysis methods elements for encryption algorithm based on dynamic chaos 48

Ответственный секретарь редакции

Лакин В. И.

Адрес редакции

ул. Франциска Скорины 25/3, Минск,
220114,
Республика Беларусь
Тел. +375 17 267-66-84
e-mail: CA_PI@bntu.by

Executive secretary of the editorial board

V. Lakin

Editorial board address

25/3 Franciska Skariny str., Minsk, 220114,
Republic of Belarus
Tel. +375 17 267-66-84
e-mail: CA_PI@bntu.by

Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1540 от 08.06.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь

Подписано в печать 01.08.2015. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Ризография. Усл. печ. л. 7,67. Уч.-изд. л. 3,00. Тираж 150 экз. Заказ 960.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский национальный технический университет.
ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.
Пр. Независимости, 65, г. Минск, 220013

© Белорусский национальный технический университет

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

SYSTEM ANALYSIS

УДК 629.067

ПЕРЕВАРЮХА А. Ю.

ГРАНИЧНЫЙ КРИЗИС АТТРАКТОРА В МОДЕЛИРОВАНИИ ПРИЧИН ДЕГРАДАЦИИ ПРОМЫСЛОВЫХ БИОРЕСУРСОВ

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Рассмотрена вычислительная модель, соединяющая формализацию экологических особенностей репродуктивного цикла мигрирующих рыб и возможности исследования нелинейных эффектов в динамике популяций, подвергающихся антропогенному воздействию. Реализованная событийная компонента в непрерывном времени позволила учитывать изменения выживаемости поколения во взаимосвязи с факторами скорости роста. Дискретная составляющая траектории имеет две области притяжения и характеризуется обратной касательной бифуркации из-за воздействия промысла, что резко переводит популяцию с состояния нерегулярных флуктуаций при низкой численности. Дальнейшее возникновение граничного кризиса интервального аттрактора описывает распространенный сценарий необратимой деградации биоресурсов.

Введение

В основе моделей эксплуатируемых популяций рыб лежит формализация баланса воспроизводства и смертности от различных факторов. Естественная убыль на ранних этапах жизни очень велика и ее изменения критически сказываются на благополучии популяции крупных рыб. В ихтиологии возникло направление исследований, объясняющее закономерности изменения эффективности воспроизводства с целью определения классифицированных форм эмпирической зависимости на основе данных наблюдений для прогнозирования скорости восполнения промысловых запасов и подбора подходящего промыслового режима для особенностей нереста разных видов рыб. Нами ставится задача совершенствования математических методов системного анализа для выработки предосторожного подхода к использованию биоресурсов на основе организации непрерывно-событийной вычислительной структуры динамической системы.

Пополнением запаса будем считать численность поколения от одного нереста, дожившего до установленного момента. Для разных видов рыб этот момент может определяться достижением промысловых размеров или окончанием полового созревания. Определяющие итоговую форму зависимости механизмы действуют для рыб (называемых анадромными), которые заходят при необходимой температу-

ре в реки и нерестятся на ограниченных по площади русловых нерестилищах, как крупные лососевые и осетровые. При повышенной плотности икры на грунте наблюдается ряд негативных для выживаемости явлений, связанных с гипоксией и токсикозом. Ограниченность пригодных нерестовых участков характерна для волжской севрюги. В период масштабного гидростроительства возводились искусственные нерестилища. Для размножающихся в толще воды рыб успех репродуктивного процесса определяет благоприятное сочетание случайных флуктуаций условий среды, что снижает возможности применения детерминированных моделей. Сведения о воспроизводстве севрюги и горбуши показали, что наблюдается выраженная зависимость с двумя высокими диапазонами эффективности воспроизводства, между которыми существует промежуток численности запаса, при котором для популяции характерна низкая способность к восстановлению. С биологической точки зрения можно обосновать, что характер зависимости является следствием различия факторов смертности на разных этапах развития молоди осетровых рыб Каспийского моря.

Нелинейность в экологическом истолковании

Концепция моделей воспроизводства заключается в описании лимитирующих факторов

$v(S)$, действующих на нерестилищах при повышенной плотности запаса с репродуктивным потенциалом a : $R = aS / v(S)$. У. Рикером предложена экспоненциальная форма $v(S) = e^{bS}$, где b показатель действия лимитирующих факторов. Дж. Шепард обосновал применение зависимости по аналогии с логистической моделью: $v(S) = 1 + (S / K)^b$ где учтена критическая биомасса запаса K . Анализ моделей проводится в виде функциональных итераций $x_{n+1} = f(x_n)$. Для траектории итераций функции Рикера при возрастании a характерно изменение поведения от устойчивого равновесия R^* к хаосу через каскад удвоений М. Фейгенбаума [1]. Аналогично бифуркации удвоения периода цикла наблюдаются для модели Дж. Шепарда. Нами показано ранее, что бифуркационные параметры в двух моделях имеют противоположный смысл [2].

Аттрактор, возникающий в результате накопления каскада бифуркаций удвоения, является аналогом канторовского множества: замкнутого множества, не содержащего как внутренних, так и изолированных точек. Структурно хаотический аттрактор представляет собой результат объединения всё уменьшающихся субинтервалов, которые составляют точки отрезка за исключением несчетного числа неустойчивых точек всех периодов 2^n и их прообразов. Анализ образования и свойств канторовских множеств является отдельной задачей при исследовании нелинейных дискретных моделей. Существует теория универсальности изменения поведения отображений, удовлетворяющих критериям теоремы Д. Синжера [3] (SU -отображения).

Обычно для определения хаотичности используется свойство чувствительной зависимости от начальных условий, но на основе [4] можно ввести критерий хаотичности отображения отрезка $f: I \rightarrow I$ на основе топологической транзитивности: для всех открытых подмножеств $U \subseteq V, U \neq \emptyset$ и $Y \subseteq V, Y \neq \emptyset \exists n \geq 0$, выполняется $f^n(U) \cap Y \neq \emptyset$, то поведение хаотично.

Помимо хаотизации и эффекта экспоненциального разбегания близких траекторий в отображениях возможны другие нелинейные эффекты, связанные с окнами периодичности. Нелинейные эффекты в динамике ставят проблему сущностной интерпретации качествен-

ного поведения дискретных популяционных моделей, для которых возможна реализация бифуркаций.

Вычислительный базис новой модели

Физиологи выделяют стадии развития молодежи по мере формирования органов и характера передвижения. Изменения происходят по мере размерного развития за счет питания особей, скорость которого представим в уравнении обратно пропорциональной плотности:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{g}{N^k(t) + l}, k < 1, \quad (1)$$

где g – параметр объема доступных кормовых ресурсов, l – учитывает ограничение скорости развития не связанное с плотностью. Важнейшие изменения, как переход на активное питание и начало самостоятельной миграции можно считать событиями. Реализуем модель со структурой, изменяемой при достижении некоторых выделяемых предикатами событий.

Предложение по формализации процесса формирования пополнения заключается в описании убыли начальной численности поколения от момента вылупления из икринок дифференциальным уравнением на промежутке времени $[0, T]$ в явном виде учитывающих разные факторы смертности и её изменение по мере развития особей:

$$\frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha w(t)N(t) + U\beta)N(t), & t < \tau \\ -(\alpha_1 N(\tau)/w(\tau) + \beta)N(t), & t > \tau, w(t) < w_{D2} \\ -\alpha_2 w(t)N^2(t), & w(t) < w_{D3}, \end{cases} \quad (2)$$

где α – коэффициент зависящей от плотности компенсационной смертности; β – коэффициент нейтральной убыли. От абстрактного «репродуктивного потенциала» разумно перейти к естественному показателю средней плодовитости λ , оцениваемой по данным мониторинга. Начальные условия для уравнений (1), (2): $w(0) = w_0, N(0) = \lambda S$. Время τ – длительность первой стадии с эндогенным питанием, для севрюги в среднем составляет 8 суток. w_D – условный уровень развития, при достижении которого меняется действие факторов смертности, что интерпретируется экологией обитания молодежи при начале самостоятельной миграции. По данным о воспроизводстве волжской севрюги выявлено действие отрицатель-

ного эффекта группы. При низкой плотности уменьшается вероятность встреч на нерестилищах, что сильно сокращает продуктивность нереста. Правую часть (2) дополним $U(S)$ стремящейся к 1 $E(U)=[2,1)$:

$$U(S) = 1 + \exp(-cS^2), \quad (3)$$

где параметр $c < 1$ определяет степень выраженности эффекта. ОДУ (1), набор правых частей (2) с (3) формируют непрерывно-дискретную вычислительную структуру. Особенность дискретно-событийного подхода составляют переходы, которые происходят между состояниями моделируемой системы согласно графу всех возможных состояний. В применяемом методе на основе гибридного автомат переключение реализуется между *режимами изменения* состояния. Режимам изменения сопоставлен набор форм правой части системы ОДУ из (2), алгоритм контроля предикатов определяет выбор решаемой в данный момент задачи Коши с инициализацией новых начальных условий. Промежуток интервала уязвимости разделен на последовательность кадров гибридного модельного времени. Множество решений задач Коши для допустимых $S \in \mathbb{Z}^+$ определит интересующую нас зависимость.

Вычислительное исследование

В вычислительной среде получена неунимодальная «волнообразная» зависимость $R = \varphi(S)$ запаса и пополнения, о причинах наблюдения которой для крупных рыб писал Рикер в [6]. Зависимость (рис. 1) без учета действия промысловой смертности характеризуется четырьмя нетривиальными стационарными точками $R_i^*, i = 1 \dots 4$, пересечениями кривой с биссектрисой координатного угла $R = S$. График второй итерации $\varphi(\varphi(S)) \equiv \varphi^2(S)$ показал устойчивость четвертой точки наряду с устойчивостью $R = 0$. Для дискретной динамической системы $R_{n+1} = \varphi(R_n)$ возможны качественно различные варианты поведения в зависимости от вычисленного значения функции в двух точках локальных экстремумов $\min \varphi(R)$, $\max \varphi(R)$, $R_1^* < R < R_3^*$. Практический интерес представляет выполнение условий существование окрестности ε превышения пороговых значений: $\varphi(R_{\max} \pm \varepsilon) > R_3^*$, $\varphi(R_{\min} \pm \varepsilon) < R_1^*$. При выполнении условий фиксируется образование в фазовом пространстве объекта, отно-



Рис. 1. $\varphi(R)$ с четырьмя стационарными точками

сящегося к разновидности непритягивающих хаотических множеств.

В простейшем случае границей является неустойчивая «репеллерная» точка. Если для динамической системы существует два аттрактора при исследовании необходимо определить границу их областей притяжения. В нашем случае границу составляет множество прообразов неустойчивых точек R_i^* , которые не притягиваются ни к одному из аттракторов. Обе области притяжения в диапазоне $[R_1^*, R_3^*]$ представляются несвязным объединением малых интервалов.

Обсуждение вычислительных экспериментов

Получена ситуация образования канторовской структуры границы, которая представляет собой всюду разрывное множество точек, приводит к появлению длительного переходного хаотического режима, реализующегося до момента $\varphi^z(R_0) > R_3^*$ (или $\varphi^z(R_0) < R_1^*$), его достижение означает стремительное развитие неожиданной «вспышки» численности (рис. 2) популяции. Число итераций z пребывания траектории в переходном аperiодическом режиме чувствительно зависит от начальных условий [6] и соответственно от точности вычислений.

При рассмотрении в модели увеличения промысловой смертности изменяется конфигурация стационарных точек. Для динамической системы возможна обратная касательная бифуркация: слияние R_3^*, R_4^* с исчезновением стационарной точки, при сохранении оставшихся R_1^*, R_2^* . В таком случае возможны два варианта, определенные смещающимся значением $\varphi_1(R_{\min})$ в точке минимума измененной зависимости (рис. 3). При выполнении условия $\varphi_1(R_{\min}) > R_1^*$ траектории притягиваются к интервальному аттрактору, неустойчивая точ-

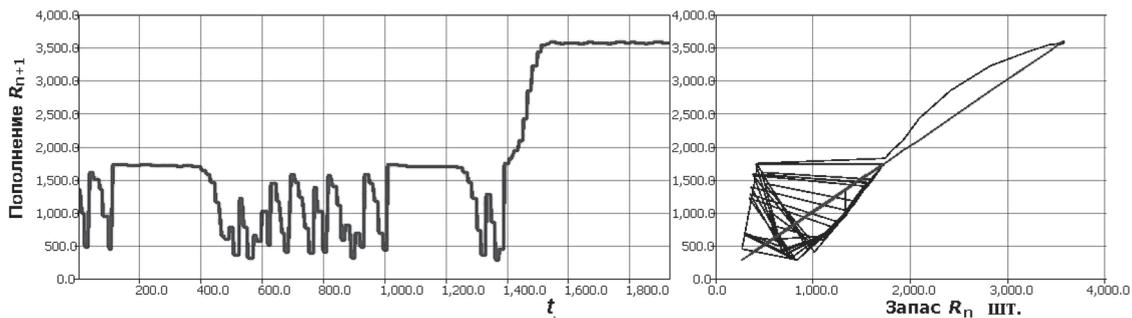


Рис. 2. Выход из режима переходного хаоса (временная и фазовая диаграммы)

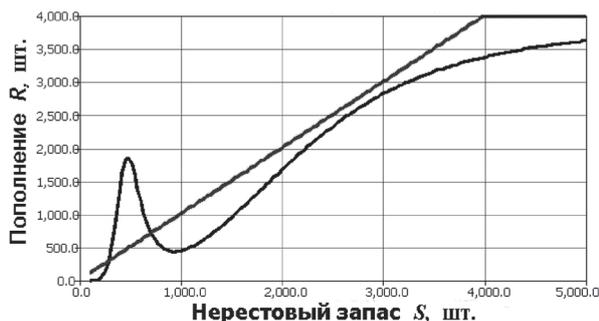


Рис. 3. $\varphi(R)$ после обратной касательной бифуркации

ка R_1^* служит границей с областью притяжения тривиального равновесия (рис. 4). Тогда после обратной касательной бифуркации траектория моментально переходит к устойчивому аperiodическому режиму, что соответствует колебаниям в диапазоне низкой численности популяции без возможности восстановления. Подобная ситуация из-за последствий длительного перелома наблюдается сейчас с осетровыми рыбами Каспийского моря, где промысел не был остановлен своевременно.

В момент достижения $\varphi_1(R_{\min}) < R_1^*$ происходит граничный кризис интервального аттрактора [7]. При подобном кризисе аттрактор соприкасается с границей, теряет свойство инвариантности при сохранении локально-несвязной структуры у вновь появившегося непритя-

гивающего хаотического множества типа «хаотическое седло» по классификации Ц. Гребоджи [8]. Единственным аттрактором остается тривиальное равновесие, что описывает неминуемую деградацию популяции после короткого переходного аperiodического режима флуктуаций.

Заключение

Разработанная модель формирования поколений популяций обладает рядом дополнительных возможностей по сравнению с известными аналогами. В частности свойства непрерывно-дискретной динамической системы позволят описывать зафиксированные в ряде случаев [9] для промысловых популяций горбуши тихоокеанского побережья Канады изменения, связанные с существованием двух уровней численности популяции: низкой и высокой. При низкой численности популяция испытывает резкие флуктуации, но существует перспектива восстановления высокой численности при прекращении промысла. Лососевые и осетровые виды существенно отличаются длительностью жизненного цикла, однако имеют сходные экологические условия воспроизводства, что позволяет проводить сравнение данных промысловой статистики. В режиме переходного хаоса мы не можем предсказать, к какому

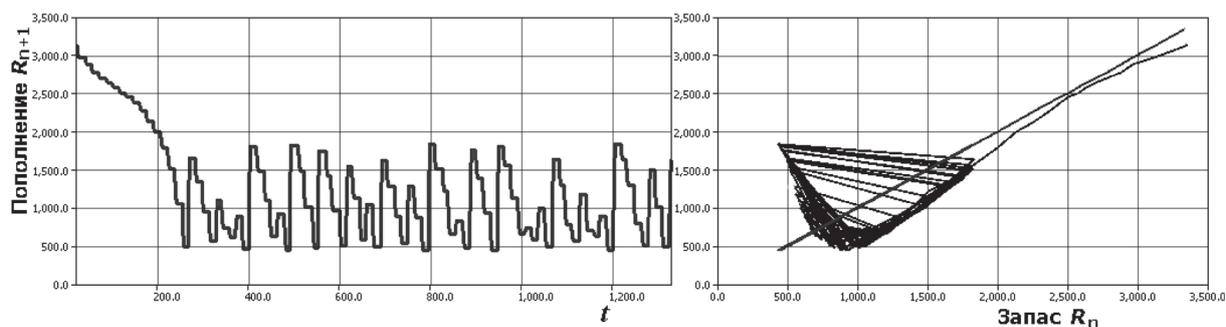


Рис. 4. Динамика в интервальном аттракторе (временная и фазовая диаграммы)

из альтернативных аттракторов в результате устремится траектория и данное свойство определяется как неопределенность относительно асимптотического состояния динамической системы.

При исследовании модели установлена возможность трансформации двух различных хаотических режимов при касательной бифуркации, переходного и устойчивого, связанного с интервальным аттрактором. Данная трансформация интерпретируется как последствие усиления промыслового давления и влечет длительное пребывание популяции в неблаго-

приятном для промысла состоянии. Реализация граничного кризиса аттрактора, теряющего свойство инвариантности, описывает сценарий необратимой деградации популяции, для которой уже необходимы меры по искусственному сохранению генофонда. Подобная ситуация стремительного сокращения численности нерестовой части произошла с волжской севрюгой несмотря на организованное искусственное заводское воспроизводство, с 2010 г. включенной в «Красную книгу».

*Работа поддержана
грантом РФФИ № 14-07-00066,
руководитель Переварюха А. Ю.*

Литература

1. **Feigenbaum M. J.** Universal behavior in nonlinear systems / M. J. Feigenbaum // *Physica D.*– 1983.– Vol. 7, № 1–3.– P. 16–39.
2. **Perevaryukha A. Yu.** Cyclic and unstable chaotic dynamics in models of two populations of sturgeon fish / A. Yu Perevaryukha. // *Numerical Analysis and Applications.*– 2012.– Vol. 5, № 3.– P. 254–264.
3. **Singer D.** Stable orbits and bifurcations of the maps on the interval / D. Singer // *SIAM journal of applied math.*– 1978.– V. 35.– P. 260–268.
4. **Vellekoop M.** On intervals, transitivity = chaos / M. Vellekoop, R. Berglund // *The American Mathematical Monthly.*– 1994.– Vol. 101, № 4.– P. 353–355.
5. **Ricker W. E.** Stock and recruitment / W. E. Ricker // *Journal Fisheries research board of Canada.*– 1954.– Vol. 11, № 5.– P. 559–623.
6. **Paar V.** Sensitive dependence of lifetimes of chaotic transient on numerical accuracy for a model with dry friction and frequency dependent driving amplitude / V. Paar, N. Pavin // *Modern Physics Letters B.*– 1996.– Vol. 10, № 4.– P. 153–159.
7. **Grebogi C.** Chaotic attractors in crisis / C. Grebogi, E. Ott, J. A. Yorke // *Physical Review Letters.*– 1982.– Vol. 48, № 22.– P. 1507–1510.
8. **Grebogi C.** Chaos, strange attractors and fractal basin boundaries in nonlinear dynamics / C. Grebogi, E. Ott, J. A. Yorke // *Science.*– 1987.– Vol. 238, № 4827.– P. 632–638.
9. **Minto C.** Survival variability and population density in fish populations / C. Minto, R. A. Myers, W. Blanchard // *Nature.*– 2008.– Vol. 452.– P. 344–348.

Поступила 25.08.15

UDC 629.067

Perevarukha A. Yu.

BOUNDARY CRISIS OF ATTRACTOR IN THE SIMULATION CAUSES OF THE DEGRADATION OF COMMERCIAL BIORESOURCES

The article describes the computational model that unites the formalization of ecological features of the reproductive cycle of anadromous fish and the possibility of studying nonlinear effects in the population dynamics under anthropogenic impact. Event-driven component implemented in continuous time has allowed us to take into account changes in the survival generation in interrelation with the factors of growth rate. Discrete component trajectory of the dynamical system has two areas of attraction and is characterized by the reverse tangent bifurcation due to the impact of fishing, which dramatically transforms the population with the condition of irregular fluctuations in low numbers. The further emergence of «boundary crisis» for the interval attractor describes a common scenario an irreversible degradation of biological resources.

**УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT OF
TECHNICAL OBJECTS**

УДК 621.316.726.078

ЛУКАШОВ С. И., НАПРАСНИКОВ В. В., БОГАЧУК А. М.

ИССЛЕДОВАНИЕ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОЙ КОНСТРУКЦИИ С БОЛЬШИМИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО ПОДХОДА

Белорусский национальный технический университет

В статье на примере конструкции пальца манипулятора, взаимодействующего с захватываемой деталью, рассмотрена методика решения контактных задач, с учетом нелинейных свойств материала пальца на основе модели Муни-Ривлина. Представлены результаты многокритериальной оптимизации этой конструкции.

Ключевые слова. Метод конечных элементов, робототехника, эластомеры, многокритериальная оптимизация.

Введение

В настоящее время промышленная робототехника становится неотъемлемой частью любого производства, существенную роль в этом сыграли так называемые промышленные роботы.

Одной из основных составных частей промышленного робота является манипулятор. Манипулятор – это управляемый механизм (или машина), который предназначен для выполнения двигательных функций, аналогичных функциям руки человека при перемещении объектов в пространстве, и оснащён рабочим органом.

Манипуляторы применяются для функционирования в среде, отличающейся опасностью или не доступной для людей. Помимо того, эти устройства используются в качестве вспомогательных роботов в промышленном производстве и в медицинской практике – во время создания протезов. Одним из наиболее популярных манипуляторов в наше время считается механическая «рука».

Возможным вариантом реализации манипулятора типа «рука» может быть конструкция на основе пневматических пальцев (рис. 1) [1].

К преимуществам манипуляторов такой конструкции можно отнести возможность транспортировки хрупких, легкодеформируемых предметов.

Основой манипулятора типа «рука» являются пневматические пальцы. Пневматический палец представляет собой гибкий стержень с полыми камерами (рис. 2).

Деформация такой конструкции достигается путем нагнетания сжатого газа в полости под давлением.

Когда палец прихватывает деталь, возникает область контакта между пальцем и деталью, трение в которой обеспечивает формирование прижимного усилия. Возникает вопрос о выборе таких геометрических параметров и ма-



Рис. 1. Манипулятор типа «рука» на основе пневматических пальцев

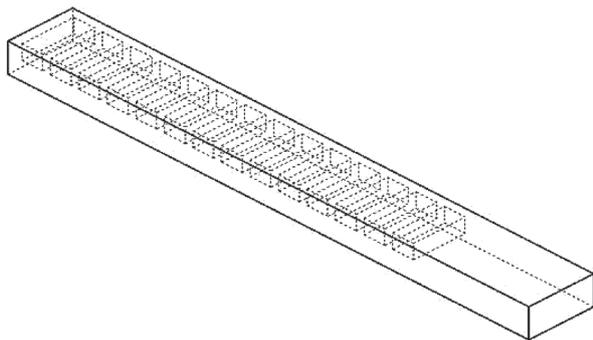


Рис. 2. Пневматический палец

териала конструкции пальца манипулятора, которые обеспечили бы для него максимальное прижимное усилие.

Таким образом, актуальной является задача о построении математической параметризованной модели пальца манипулятора и дальнейшей оптимизации робототехнической конструкции. Одним из современных подходов к решению этой задачи является использование метода конечных элементов.

Подготовка конечно-элементной модели

Метод конечных элементов является сеточным методом, предназначенным для решения задач микроуровня, для которого модель объекта задается системой дифференциальных уравнений в частных производных с заданными краевыми условиями [2].

Элементы бывают одномерными, плоскими и пространственными, с прямолинейными или криволинейными сторонами. Вдоль каждой из них может быть два или более узлов. Во всех узлах задаются обобщенные координаты y_k , называемые узловыми смещениями, совокупность которых для данного элемента запишем в виде матрицы:

$$\{y\} = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}^T, \quad (1)$$

где N – общее число узловых смещений элемента; T – означает транспонирование матрицы.

Узловые смещения могут представлять собой компоненты вектора перемещения узлов вдоль осей координат, а также углы поворота элемента в узловых точках. В пределах каждого элемента для компонент вектора перемещения \vec{u} любой точки M задают аппроксимацию через узловые смещения, которые являются неизвестными величинами:

$$u_i(M) = \Phi_{ik}(M)y_k, \quad i = 1, 2, 3, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

или в матричной записи

$$\{u\} = \{\Phi\} \{y\}, \quad (3)$$

и векторной форме

$$\vec{u} = \Phi_{ik} \vec{e}_k y_k = \Phi_k y_k = \{\Phi\} \{y\}, \quad (4)$$

где величины $\Phi_{ik}(M)$ называются *функциями формы элемента* и выражают связь между узловыми смещениями и перемещением точки тела.

В качестве функций формы обычно используют полиномы, вне элемента данные функции полагаются равными нулю.

$$\Phi_k = \Phi_{ik} \vec{e}_i, \quad \{\Phi\} = \{\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_N\}, \quad (5)$$

где \vec{e}_i – единичные орты.

Здесь и далее, если не оговорено особо, используется *правило суммирования* по повторяющимся индексам, то есть запись вида $a_i b_i$ необходимо воспринимать как сумму $\sum a_i b_i$.

Соотношения (2) подставляются в уравнения равновесия тела, из которых и определяются узловые смещения $\{u\}$ для каждого элемента [2].

Модель материала Муни-Ривлина

Использование модели материала Муни-Ривлина позволяет добиться нелинейности в поведении модели [3]. Таким образом, данная модель хорошо подходит для исследования поведения эластомеров, из которых изготавливаются палец манипулятора.

Основной характеристикой модели материала Муни-Ривлина является удельная энергия деформирования (6):

$$W = C_{10} (I_1 - 3) + C_{01} (I_2 - 3) + d^{-1} (J - 1)^2, \quad (6)$$

где I_i – i -е инварианты девиатора деформации; C_{10} , C_{01} – коэффициенты модели, материальные константы; J – детерминант матрицы градиента деформации; d – коэффициент несжимаемости материала (7);

$$d = \frac{1 - 2\vartheta}{C_{10} + C_{01}}, \quad (7)$$

где ϑ – коэффициент Пуассона.

Величина W удовлетворяет требованию симметрии относительно главных деформаций l_1 , l_2 , и l_3 , что объясняется изотропностью недеформированного материала. Инварианты тензора деформаций представляются в виде (8–10):

$$I_1 = l_1^2 + l_2^2 + l_3^2, \quad (8)$$

$$I_2 = l_1^2 l_2^2 + l_2^2 l_3^2 + l_3^2 l_1^2, \quad (9)$$

$$I_3 = l_1^2 l_2^2 l_3^2, \quad (10)$$

Для эластомеров при этом выполняется равенство (11):

$$I_3 = 1, \quad (11)$$

Напряжения Коши в резине (12):

$$\sigma_{\text{шо}} = -p\delta_{ij} + 2\frac{\partial W}{\partial I_1}C_{ij} - 2\frac{\partial W}{\partial I_2}C_{ij}^{-1}, \quad (12)$$

где p – давление; C_{ij} – главные инварианты; δ_{ij} – дельта-функция Кронекера.

Для определения значений коэффициентов C_{10} и C_{01} в выражении (6) в данной работе использовались экспериментальные диаграммы деформирования.

Выполнение оптимизации

Для выбора параметров конструкции, обеспечивающих получение максимальной интегральной силы удерживания была проведена многокритериальная оптимизация.

К варьируемым параметрам оптимизации относятся геометрия пальца, а также давление газа в полостях конструкции. Критериями являются: максимальная интегральная сила прижима пальца к детали (данный критерий подвергнется максимизации) и максимальное эквивалентное напряжение, возникающее в материале пальца (данный критерий подвергнется минимизации).

Так как основным критерием оптимизации является максимальная интегральная сила при-

жима пальца к детали, то необходимо дополнить геометрию, добавив объект, представляющий захватываемую деталь.

После добавления захватываемой детали настоящая задача будет иметь статус контактной.

При создании геометрической модели захватываемой детали следует располагать ее таким образом, чтобы она находилась в начальной фазе соприкосновения с пальцем. Это позволит в дальнейшем решателю сократить количество рассчитываемых итераций перед контактом, что в свою очередь уменьшит время расчета на каждом шаге оптимизации (рис. 3).

При задании контактной пары рекомендуется руководствоваться перечисленными ниже правилами:

1) Если одна поверхность (А) является плоской или вогнутой, а другая поверхность (В) является острым ребром или выпуклостью, то поверхность А должна быть целевой.

2) Если обе контактирующие поверхности выпуклые, то в качестве целевой поверхности принимается поверхность с меньшим радиусом кривизны.

3) Если обе поверхности являются плоскими, выбор контактной и целевой произволен.

4) Если первая контактная поверхность имеет острое ребро, а другая не имеет его, то первая принимается в качестве контактной поверхности.

5) Если одно из контактирующих тел абсолютно жесткое, то его поверхность принимается целевой.

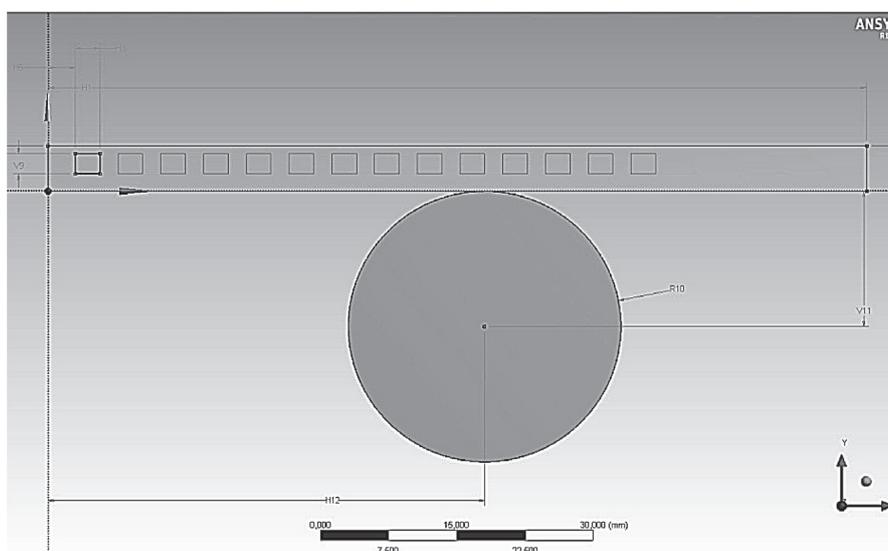


Рис. 3. Расположение захватываемой детали относительно пальца

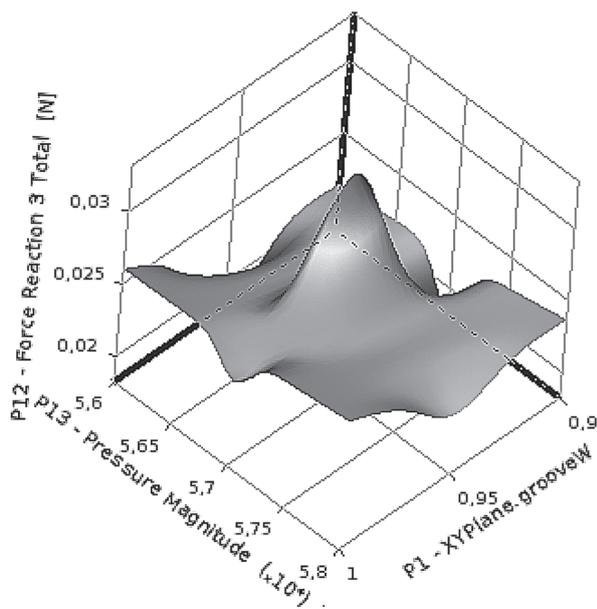


Рис. 4. Поверхность отклика для двух параметров

На основании вышеперечисленного было принято решение использовать в качестве целевого тела захватываемую деталь.

Оптимизация начинается с расчета опорных точек. Они необходимы для построения поверхности отклика. Учитывая количество параметров оптимизации и потенциальную сложность поверхности отклика, было решено использовать кригинг как способ построения поверхности отклика.

Кригинг – это вид обобщенной линейной регрессии, использующей статистические параметры для нахождения оптимальной оценки близости экспериментальных данных в смысле минимального среднеквадратического отклонения при построении поверхностей. С точки зрения общей статистики кригинг заключается в минимизации дисперсии ошибки измерения, которая является функцией от измеряемых весов. Минимизация данной дисперсии уменьшает среднюю квадратическую ошибку

отклонения оцененного значения от возможного. Достигается это путём приравнивания к нулю первой производной ошибки относительно каждого неизвестного веса. В итоге выводится система уравнений, решением которой является вектор весов.

На рис. 4 изображена полученная в результате расчетов поверхность отклика. Двумя варьируемыми параметрами в данном случае принимались давление в полости пальца и ширина полости. Выходным параметром являлось интегральное прижимное усилия по зоне контакта.

Далее были заданы веса критериев и выбран алгоритм оптимизации. Для расчета многокритериальных задач оптимизации в ANSYS существует два алгоритма: Screening и Multi-objectiveGeneticAlgorithm (MOGA).

Screening – это простейший метод оптимизации, осуществляющий перебор точек возможных решений.

Multi-objectiveGeneticAlgorithm – это многокритериальный эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Он является разновидностью эволюционных вычислений, с помощью которых решаются оптимизационные задачи с использованием методов естественной эволюции, таких как наследование, мутации, отбор и кроссинговер. Отличительной особенностью генетического алгоритма является акцент на использование оператора «скрещивания», который производит операцию рекомбинации решений-кандидатов, роль которой аналогична роли скрещивания в живой природе [4].

Для проведения оптимизации был выбран алгоритм MOGA поскольку он позволяет

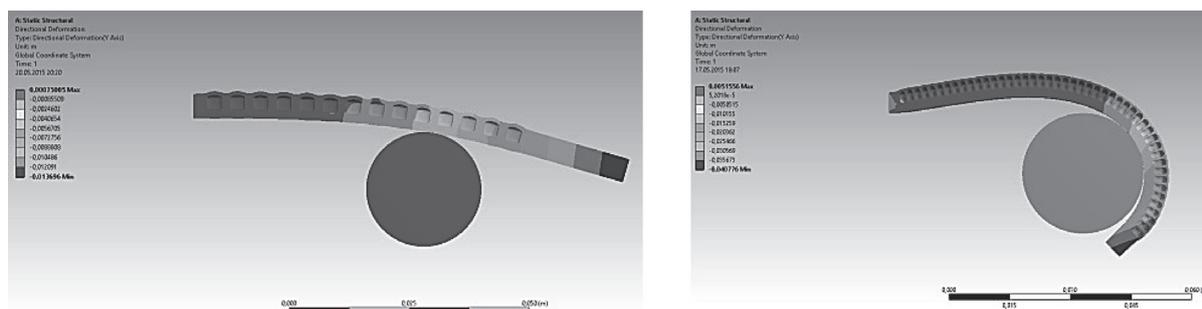


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние пальца до оптимизации (слева) и после оптимизации (справа)

найти экстремум функции за меньшее число итераций по сравнению с алгоритмом Screening.

Результаты расчета конструкции с использованием оптимизированных параметров и до оптимизации, изображены на рис. 5.

На представленных рисунках хорошо видно, что зона контакта пальца с прихватываемой деталью существенно увеличилась, что приводит к увеличению интегрального прижимного усилия.

Сравнение значений критериев до и после оптимизации приведено в таблице.

Значения критериев до и после оптимизации

Критерий	До оптимизации	После оптимизации
Эквивалентное напряжение	1,0702e + 5 Па	2,0101e + 5 Па
Интегральное усилие в контакте	0,434 e – 2 Н	4,066e – 2 Н

Выводы

Как следует из результатов оптимизации, интегральное усилие в зоне контакта пальца с прихватываемым объектом было значительно увеличено, при этом значение эквивалентного напряжения в материале конструкции пальца, хотя и увеличилось, но не превысило допустимого предела для используемого эластомера.

В результате оптимизации модифицировав геометрические параметры полостей пальца и давления газа, нагнетаемого в полости пальца, удалось увеличить интегральное прижимное усилие в контакте более чем в девять раз. Ослабление конструкции при этом не критично, так как максимальное эквивалентное напряжение в материале пальца после оптимизации составило 2,0101e+ 5 Па, что меньше допустимого для эластомеров.

Литература

1. Huei-Huang, L. Finite elements simulations with ANSYS Workbench 14 / L. Huei-Huang. – Kansas: SDC, 2012. – 602 p.
2. Сабоинадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов в САПР. М.: Мир, 1989. – 190 с.
3. Рубцов Б. Г. Теоретическое руководство ANSYS 5.3 / Б. Г. Рубцов, И. Р. Идрисова. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. – 117 с.
4. Steven, S. The Algorithm Design Manual / S. Steven. – Springer: CRC Press, 2008. – 184 p.

Поступила 25.07.15.

После доработки 20.09.15

S. I. Lukashov, V. V. Naprasnikov, A. M. Bogacuk

RESEARCH OF THE ROBOTIC DESIGN WITH LARGE DEFLECTIONS USING FINITE ELEMENT ANALYSIS

In this article, methods of solving the contact problem based on Mooney Rivlin model including material nonlinearities are considered in the context of the manipulator finger reacting with the capture part. The results of multiobjective optimization of the construction are presented.

IMAD ELZEIN

MAXIMUM POWER POINT TRACKING SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC STATION: A REVIEW

Belarusian National Technical University

In recent years there has been a growing attention towards the use of renewable energy sources. Among them solar energy is one of the most promising green energy resources due to its environment sustainability and inexhaustibility. However photovoltaic systems (PhV) suffer from big cost of equipment and low efficiency. Moreover, the solar cell V-I characteristic is nonlinear and varies with irradiation and temperature. In general, there is a unique point of PhV operation, called the Maximum Power Point (MPP), in which the PV system operates with maximum efficiency and produces its maximum output power. The location of the MPP is not known in advance, but can be located, either through calculation models or by search algorithms. Therefore MPPT techniques are important to maintain the PV array's high efficiency. Many different techniques for MPPT are discussed. This review paper hopefully will serve as a convenient tool for future work in PhV power conversion.

1. Introduction

Solar Energy is one of the most promising green energy resources due to its environment sustainability and inexhaustibility. Solar Energy has certain advantage over another «Renewable Energy» resources such as wind and ocean water and hydro power station. Photovoltaic energy is a sort of solar energy that is available in almost all parts of the world and has the least maintenance since it attracts many researches toward this kind of clean and renewable energy.

Due to the severity of the global energy crisis and environmental pollution, the photovoltaic (PV) system has become one kind of important renewable energy source. Solar energy has the advantages of maximum reserve, inexhaustibility, and is free from geographical restrictions. Solar energy stations have been built in all areas of the Planet-from Alaska to Egypt and Saudi Arabia.

At the same time despite mentioned advantages photovoltaic (PV) cell has low energy conversion efficiency. Typically, a PV cell generates a voltage around 0.5 to 0.8 volts depending on the semiconductors and the built-up technology. This voltage cannot be used as it is too low. The solution comes with a help of parallel-series connection tens of PV cells, involving up to 72 cells are connected to form a PV panel. In case of parallel

connection their currents are added while the voltage is the same. In case the modules are connected in series their voltages are added with the same current.

Three major families of PV cells are monocrystalline technology, polycrystalline technology and thin film technologies. The monocrystalline and polycrystalline technologies are based on micro-electronic manufacturing technology and their efficiency is in general between 10% and 15% for monocrystalline and between 9% and 12% for polycrystalline. For thin film cells, the efficiency is 10% for a-Si, 12% for CuInSe₂ and 9% for Cd Te.

The efficiency of a PV plant is affected mainly by three factors: the efficiency of the PV panel (in commercial PV panels it is between 8–15% [1], the efficiency of the inverter (95–98% [2]) and the efficiency of the maximum power point tracking (MPPT) algorithm (which is over 98% [3]).

Solar photovoltaic is a phenomenon where the solar irradiation is converted directly into electricity via solar cell [2] and the process does not have any materials to be consumed or emitted. Solar electrification can be applied even in rural areas where stand-alone PV system can supply adequate electricity for certain area independently without the need of having connection with utility grid.

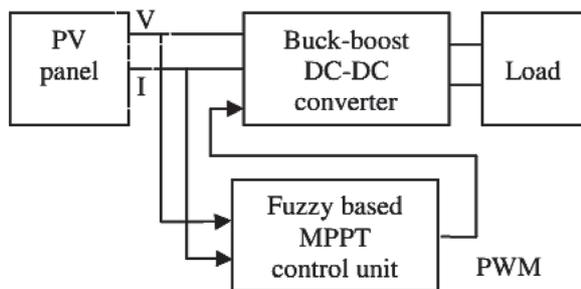


Fig. 1. Solar PhV station block diagram

Improving the efficiency of the PV panel and the inverter is not easy as it depends on the technology available, it may require better components, which can increase drastically the cost of the installation.

The PV array has a particular operating point that can supply the maximum power to the load which is generally called maximum power point (MPP).

The maximum power point has a non-linear locus where it varies according to the solar irradiance and the cell temperature [2]. To boost the efficiency of PV system, the MPP has to be tracked followed by regulating the PV panel to operate at MPP operating voltage point, thus optimizing the production of electricity. This process can draw as much power as possible that the PV panel can produce.

Instead, improving the tracking of the maximum power point (MPP) with new control algorithms is easier, not expensive and can be done even in plants which are already in use by updating their control algorithms, which would lead to an immediate increase in PV power generation and consequently a reduction in its price.

Many researches pay attention to MPP problem. One paper presents a survey and a discussion of several MPPT methods [3]. Another papers present a ranking of ten widely adopted MPPT algorithms (P&O, modified P&O, Three Point Weight Comparison [4–7].

Constant Voltage, IC, IC and CV combined, Short Current Pulse, Open Circuit Voltage, the Temperature Method and methods derived from it, based on simulations, under the energy production point of view. The MPPT techniques are evaluated considering different types of insulation and solar irradiance variations and calculating the energy supplied by a complete currently more research works has been focused on how to extract more power effectively from the PV cells.

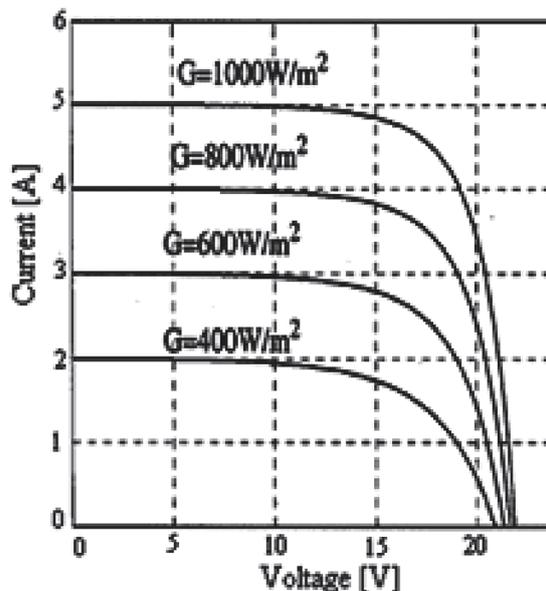
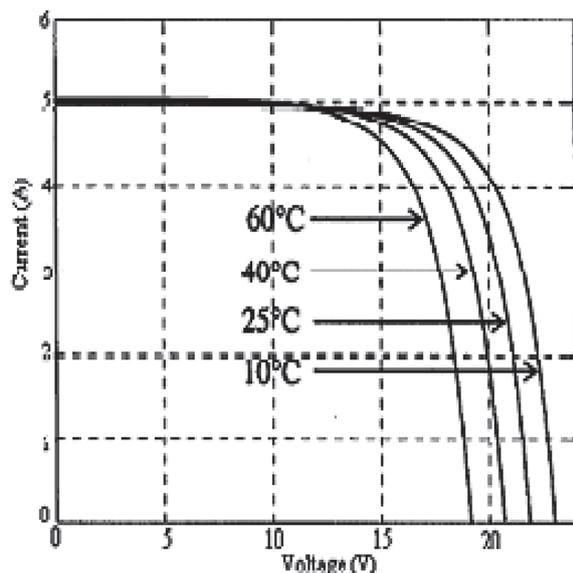


Fig. 2. I - V solar cell characteristics Irradiance

2. System description. Problem overview

Solar PhV station can be illustrated as shown in Fig. 1. The system consists of a PhV panel (a number of PhV modules, connected in series-parallel mode), power DC-DC converter (mostly buck, boost or buck-boost converter), number of sensors to measure current and voltage, MPPT control unit and a load. The electric power produced by PhV panel is supplied to the load through a DC-DC converter, controlled by PWM signal. The output voltage and current from the PhV panel are fed to the MPPT control unit to determine the controlled voltage reference for DC-DC converter.

Fig. 2 and Fig. 3 show V - I (Volt-Ampere) characteristic at constant temperature and constant irradiance respectively. Fig. 4 and Fig. 5 present power curve of the PhV array. As it follows from Fig. 4 and Fig. 5 the output power hardly nonlinear to current and voltage [5, 6, 7]. The problem considered by MPPT techniques is to automatically trace the voltage V_{MPP} or current I_{MPP} at which a PhV array should operate to obtain the maximum power output P_{MPP} under a given temperature and irradiance. It is noted that under partial shading conditions, in some cases it is possible to have multiple local maxima, but overall there is still only one true MPP. Most developed techniques respond to changes in both irradiance and temperature, but some are specifically more useful if temperature is approximately constant. Most techniques would automatically

Fig. 3. I - V characteristics-at constant temperature

respond to changes in the array due to aging, though some are open-loop and would require periodic on-line tuning. In our context, the array will typically be connected to a power converter that can vary the current coming from the PV array.

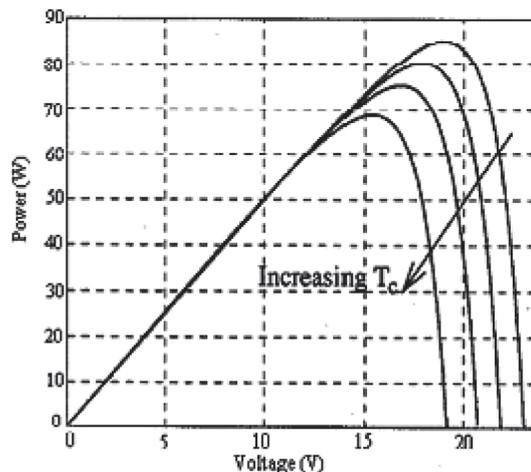
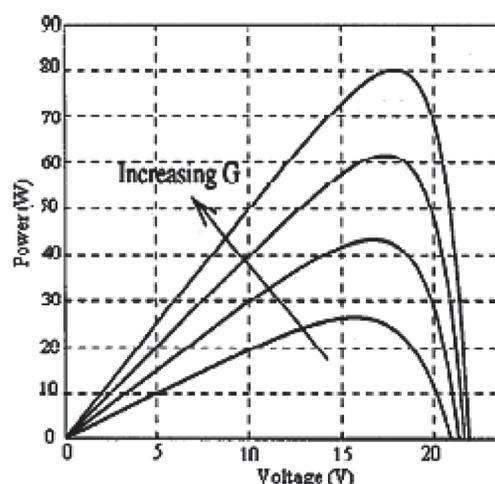
Through a DC-DC converter, MPPT control unit is able to vary the PhV operating voltage and search with accordance to the built in algorithm for the maximum power that the PV panel can deliver.

3. Maximum Power Point Tracking: Methods and Algorithms

Utilizing PV systems as an alternative source of energy requires a substantial amount of investment. In order to reduce the overall cost of PV systems, therefore, extraction of the maximum power from a solar cell turns out to be a vital consideration for optimal system design.

At the appropriate operating point for a solar cell, assuming a given cell efficiency, the maximum output power depends on the radiation intensity, ambient temperature and load impedance.

There is a single operating point enabling attainment of maximum power, tracking of which through variations in radiation efficient operation of the solar cell array (Fig. 2). The fundamental problem addressed by MPPT is to automatically determine the PV output voltage or output current for which the PV array produces maximum output power under a given temperature and irradiance. Attainment of maximum power involves

Fig. 4. P - V characteristics at constant IrradianceFig. 5. P - V characteristics at constant temperature

load-line adjustment under variations in irradiation level and temperature. The maximum power point tracking, MPPT not only enables an increase in the power delivered from the PV module to the load, but also enhances the operating lifetime of the PV system [1].

A variety of MPPT methods have been developed and implemented [4, 6]. They range from the almost obvious (but not necessarily ineffective) to the most creative (not necessarily most effective). In fact, so many methods have been developed that it has become difficult to adequately determine which method, newly proposed or existing, is most appropriate for a given PV system [6].

These method can be differentiated based on various features including the types of sensors required, convergence speed, cost, range of effectiveness, implementation hardware requirements, popularity, reliability, cost of maintenance.

In its variety, however, different MPPT methods can further be categorized on:

- **offline methods**, which are dependent on solar cell models,
- **online methods**, which do not specifically rely on modeling of the solar cell behavior, and
- **hybrid methods**, which are a combination of the aforementioned methods. The offline and online methods can also be referred to as the model-based and model-free methods, respectively.

3.1. Offline methods

In particular, the given method is identified as offline if they are depended on the physical data model of the solar cells to track the maximum power point [8].

Offline methods generally require to one or more of the solar panel values, such as the open circuit voltage (VOC), short circuit current (ISC), temperature and irradiation. These values are employed to generate the control signal necessary for driving the solar cell to its maximum power point (MPP). In the course of the tracking operation, this control signal remains constant if ambient conditions can be regarded as fixed and there are no attempts to regulate the output power of the PV system.

The behavior of a Solar Cell can be modeled by a 1-diode/2-resistor electric circuit [8]. The more accurate 2-diode/2 resistor model introduce the effect of recombination of electrons and holes.

The analytical approach is usually based on data from the most representative points-short circuit: $V = 0, I = I_{SC}$; and open circuit: $V = V_{oc}, I = 0$; and maximum power $V = V_{mp}, I = I_{mp}$ of the measured $I - V$ curve of the solar cell/panel (as an example see Fig. 6).

As a result there is well known equations [8] to calculate photovoltaic current

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + IR}{aV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

and thermal voltage

$$V_T = kT/q, \quad (2)$$

where I_{pv}, I_0 – photovoltaic and saturation current; R_s, R_{sh} – series and shunt resistance. Other notations can be found in [7, 8]. The analytical approach is usually based on data from the most representative points: short circuit; $V = 0, I = I_{sc}$; open circuit: $V = V_{oc}; I = 0$; maximum power: $V = V_{mp}, I = I_{mp}$

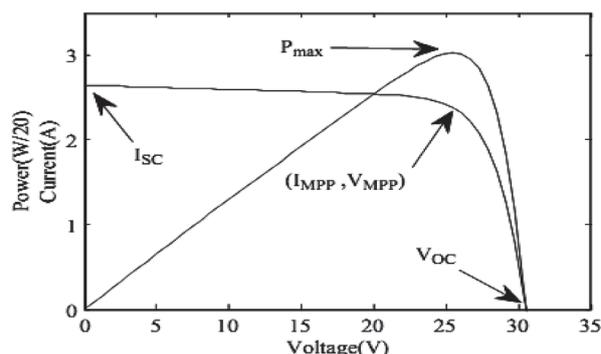


Fig. 6. Tripple-junction solar cell current-voltage ($I-V$) and power-voltage curves [8]

of the measured $I-V$ curve of the solar cell/panel, as it is shown on Fig. 6 of a triple – junction solar cell (Emcore ZTJ), developed for space application [8]. From this data it is possible to define I_{pv}, I_0 and I_{mp} . Finally as it is concluded in [8], analytical model requires rather complicated calculation, which should be proved by experimental data for given type of a solar cell/panel.

3.2. Online methods

If an MPPT method does not rely on a model, but instead employs measured instantaneous values of PV output current and output voltage in order to track MPP with higher accuracy, it is referred to as an online method.

In these methods, the instantaneous values of the PV output voltage or current (Fig. 2–5) are used usually to generate the control signals.

The control signal is applied to the PhV system along with a small methodical and premeditated perturbation in voltage or current or duty cycle (control signal) and the resulting output power is determined. By analyzing response of perturbation on output power of PV panel, the direction of change (decrease or increase) of the control signal is determined. Hence, unlike offline methods, with a perturbation applied, the control signal can no longer be regarded as constant. Therefore, tracking the maximum output power involves oscillations around the optimum value.

There are several methods that have been widely implemented to track the MPP. The most widely used methods are Perturb and Observe (P&O), incremental conductance and three-point weight.

3.3. Hybrid Methods

Finally, MPPT methods which combine the offline and online approaches are grouped under hybrid MPPT methods based on the proposed

classification scheme. Furthermore, in order to facilitate selection of MPPT algorithms, the MPPT methods presented are compared based on simulation of PV systems.

In order to assess MPPT techniques including the offline, online and hybrid methods using simulations, the solar cell is modeled in an environment including the converter and load.

In hybrid methods that represent a combination of the offline and online methods, tracking of the MPP is performed in two steps: estimation and exact regulation of MPP. The First step, which involves estimation of MPP, relies on offline methods to place the set point close to MPP. The second step, which can be regarded as a fine-tuning step, is based on online methods and attempts to reach the actual value of MPP.

4. Artificial Intelligence-Based MPPT Algorithms

In recent years, fuzzy logic (FL), artificial neural networks (ANNs), and genetic algorithm (GA) techniques known as artificial intelligence techniques have been used widely in engineering problems [9–14], particularly in the MPPT process for a satisfactory result, all environmental conditions such as instantaneous climate changes, PhV cell aging and parameter fluctuation which must be taken into account in the design process of MPPT. Artificial intelligence can suggest adequate solutions for these conditions. In [14] presented an efficient MPPT algorithm developed under no uniform conditions that are based on a trained ANN, according to the occurring temperature and solar radiation changes. In many engineering applications combination of FL, ANN and genetic algorithms bring the most effectiveness [9, 12].

Well known drawbacks of fixed step size of conventional P&O systems on the way to maximum power point can be minimized by using a modified FL MPPT algorithm suggested in [13], which has improved steady-state performance by using of variable step size [13, 14, 15].

Authors in [7], [14] have also presented a new MPPT algorithms that uses fuzzy cognitive networks (FCNs), which is actually an extension model of well-known fuzzy cognitive maps (FCMs). In application, FCNs consist of nodes that represent system characteristics and possible controller movements. In addition FCNs interact with the physical system in on-line mode and develop signals to control movement and feedback from the system. Thus, FCNs accumulates knowledge and experience in the operation of the system. FCN nodes define the control and actual operating variables (voltage, current, radiation, and temperature).

Conclusion

MPPT algorithms used in PV systems are one of the most important factors for electrical efficiency of the system. Decision to use a MPPT system by the designer should be based on criteria important in application, such as efficiency, reliability, oscillation, stability and implementation based on well-known hardware.

In this study, general classification of the most studied MPPT algorithms is discussed.

Operating principles and application processes of MPPT on-line, off-line and hybrid algorithms, and have been discussed. Attention was paid to algorithms based on theory of artificial intelligence. Detail study of the MPPT systems can be found in references.

References

1. **E. Koutroulis, F. Blaabjerg.** «A New Technique for Tracking Global Maximum Power Point of PV Arrays Operating Under Partial-Shedding Conditions» IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS, vol. 2, no. 2, April 2012.
2. **Nevzat Onat.** Recent Developments in Maximum Power Point Tracking Technologies for Photovoltaic Systems. International Journal of Photoenergy, vol. 2010, Article ID 245316, 11 pp., doi:10.1155/2010/245316
3. **T. ESRAM, P. L. CHAPMAN.** Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 2, 2007, pp. 439–449,
4. **N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli.** «A technique for improving P&O MPPT performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems.» IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 11, 2009, pp. 4473–4482.
5. **P. Santiago, C. Javier, F. Sorribes-Palmer.** «On the Analytical Approach to Systems Behavior, Wind Speed Sensors Performance, and High-Speed Train Pressure Wave Effects in Tunnels», Mathematical Problems in Engineering, vol. 2015, Article ID 897357, 17 pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2015/897357>.
6. **Трещ, А. М.** Система управления фотоэлектрической установкой при автономном использовании / Ю. Н. Петренко, А. М. Трещ // Наука и техника. Межд. научно-технической журнал. Минск 2013 № 1. С. 53–56.
7. **M. Azab,** «A New Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Systems,» in WASET. ORG, vol. 34, 2008, pp. 571–574.

8. **D. P. Hohm and M. E. Ropp.** «Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms», Prog. Photovolt: Res. Appl. 2003; 11:47–62 DOI::1002/pp.459.
9. **Petrenko, Y. N.** Fuzzy logic and genetic algorithm technique for non-linear system of overhead crane / Y. N. Petrenko, S. E. Alavi Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON), 2010 IEEE Region 8 International Conference, 11–15 July 2010. pp. 848–851.
10. **Алави, С. Э.** Fuzzy logic controller for non-linear system design / С. Э. Алави, Ю. Н. Петренко // Информационные технологии в промышленности: сборник тезисов пятой Международной научно-технической конференции ИТИ*2008, г. Минск, 22–24 октября 2008. – С. 214–215.
11. **Alavi, S. E.** System control, based on the artificial intelligence techniques / S. E. Alavi, Y. N. Petrenko // Информационные технологии в промышленности: сборник тезисов шестой Международной научно-технической конференции ИТИ*2010, г. Минск, 28–29 октября 2010. – С. 170–171.
12. **Лобатый А. А., Шейников А. А., Белегов А. Н.** Диагностика стартер-генераторов постоянного тока с использованием теории нечёткой логики // Энергетика, 2011 № 5 С. 17–24.
13. **Elzein, I.** Fuzzy Logic Controller Design for Photovoltaic System / I. Elzein, Y. N. Petrenko // Information Technologies and Systems 2014 (ITS 2014), Proceedings of the Int. Conf.(BSUIR, Minsk, Belarus, 29 th October, 2014), pp. 36–37.
14. **H. I. Abdelkader, A. Y. Hatata, M. S. Hasan.** Developing Intelligent MPPT for PV Systems Based on ANN and P&O Algorithms. International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 6, Issue 2, February-2015, p. 8.
15. **I. A. Elzein, Y. N. Petrenko.** A study of maximum power point tracking algorithm for photovoltaic system using a fuzzy logic controller. WIT Transaction on Engineering Sciences, vol. 96, WIT Press, 2014, pp. 409–419.
16. **Elzein, I.** Fuzzy logic controller implementation for photovoltaic station / I. Elzein, Y. N. Petrenko // System Analysis and Applied Information Science, No. 4, 2014, pp. 44–48.

Поступила 15.06.15 После доработки 15.09.15.

Imad Elzein

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТИ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

В последние годы проявляется растущий интерес к использованию возобновляемых источников энергии, среди которых особое положение занимает солнечная энергия благодаря неисчерпаемости своих запасов. Тем не менее фотоэлектрические станции характеризуются большими капитальными затратами и низкой эффективностью преобразования. Кроме того, вольтамперные характеристики солнечных элементов (СЭ) обладают нелинейностью и зависят от температуры и уровня радиации. На характеристике СЭ имеется уникальная точка, называемая точкой максимальной выходной мощности (МВМ), на которой ФЭС работает с максимальным КПД и обеспечивает максимальную выходную мощность. Расположение этой точки заранее неизвестно и может быть определено путем аналитических вычислений или с помощью поискового алгоритма. Известны многие методы обеспечения МВМ. Обзор, представленный в настоящей статье, поможет исследователям в области проектирования и эксплуатации ФЭС.

ОПЕЙКО О. Ф.

ПОДЧИНЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТОМ С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ

Белорусский Национальный Технический Университет

Метод подчиненного управления развивается для случая параметрической неопределенности объекта. Рассматривается двухконтурная система с пропорционально-интегрирующими регуляторами, условия синтеза которой можно применить к системе со многими контурами. Необходимое в системе качество достигается при заданном распределении корней на комплексной плоскости. Распределение корней формируется с целью достижения малой чувствительности системы к изменениям параметров. Представленные примеры расчета показывают, что предложенные для параметрического синтеза регуляторы условия позволяют обеспечить принадлежность корней ограниченной области в левой полуплоскости комплексной плоскости.

Введение

Подчиненное управление [1, 2] применяется в многоконтурных системах электроприводов промышленных установок ввиду известных преимуществ. Так, применяя ПИ-регуляторы, можно получить желаемое качество регулирования не только системы в целом, но и каждого контура. При подчиненном управлении есть возможность учета не моделируемой динамики в каждом контуре. Метод [1, 2] синтеза подчиненного управления по условиям модульного и симметричного оптимумов построен в предположении, что параметры объекта управления известны и постоянны, что играет ключевую роль в этом методе синтеза. Настройка регулятора каждого контура выполняется так, что характеристические полиномы контуров и системы в целом составляют семейство нормальных полиномов [3, 4] с фактором затухания, равным двум.

Необходимое в системе качество может быть достигнуто при различных распределениях корней на комплексной плоскости, в то время, как при подчиненном управлении оно предопределено видом нормального полинома. Если ПИ регулятор каждого контура синтезировать методом модального управления [5], назначение корней, а, следовательно, и выбор желаемого характеристического полинома возможно выполнять с учетом требования робастности.

Проблема робастного синтеза [6] привлекает внимание исследователей в связи с возрастанием требований к системам управления, расширением их области применения и развитием технических возможностей для реализации алгоритмов управления.

Целью работы является определение условий параметрического синтеза ПИ-регуляторов многоконтурной системы по расположению корней в заданной области в условиях изменений параметра объекта каждого контура.

Синтез двухконтурной системы

Двухконтурная система имеет пропорционально-интегрирующие (ПИ)-регуляторы K и K_I в каждом из контуров (рисунок 1). Поскольку структура регуляторов в контурах задана, синтез сводится к определению параметров регуляторов. Передаточные функции регуляторов имеют вид

$$K(s) = c_1 \left(1 + \frac{c_0}{s} \right), \quad K_I(s) = c_{11} \left(1 + \frac{c_{01}}{s} \right),$$

Звенья объекта управления в каждом из контуров должны быть представлены передаточными функциями первого порядка по условию разрешимости задачи модального управления [4] с ПИ-регулятором первого порядка

$$V_1(s) = \frac{k_1 a_1}{s + a_1}, \quad V(s) = \frac{k_a a}{s + a},$$

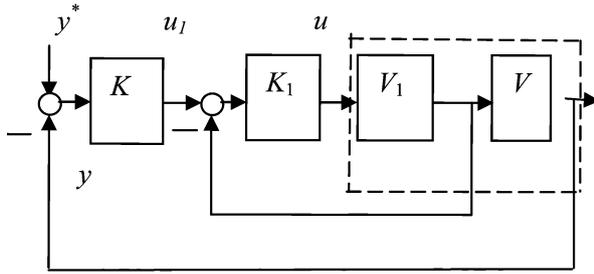


Рис. 1. Структура системы

Параметр a объекта управления подвержен изменениям и принадлежит интервалу: $a \in (\underline{a}, \bar{a})$. По условию разрешимости задачи модального управления с ПИ-регулятором при синтезе внешнего контура делается допущение, что внутренний контур $W_1(s)$ является безынерционным звеном [7].

$$W_1(s) = \frac{K_1(s)V_1(s)}{1 + K_1(s)V_1(s)} = \frac{M_1(s)}{N_1(s)} \approx 1. \quad (1)$$

Обозначив желаемые значения корней $s_{1,2} = -\alpha_0 \pm j\omega_0$, а их модуль $r_0^2 = \alpha_0^2 + \omega_0^2$, расчетный полином внешнего контура запишем в виде

$$N_{02}(s) = s^2 + 2\alpha_0 s + r_0^2, \quad (2)$$

Параметры регулятора внешнего контура легко определяются из условия равенства расчетного и фактического полиномов с учетом предположения (1).

$$b_1 = 2 \frac{\alpha_0}{a} - 1, \quad b_0 b_1 = 2 \frac{r_0^2}{a}.$$

Однако в действительности характеристический полином $N(s)$ замкнутой системы имеет вид

$$N(s) = s(s + \alpha_e)N_m(s) + \alpha b_1(s + b_0) = s^2 \bar{N}_m(s) + d_0 N_{02}(s). \quad (3)$$

Здесь полином $N_m(s)$ степени m отображает не моделируемую динамику, которая не учтена при синтезе внешнего контура и зависит от свойств внутреннего контура, а d_0 – свободный член полинома $N_m(s)$,

$$N_m(s) = s^m + d_{m-1}s^{m-1} + d_{m-2}s^{m-2} + \dots + d_1 s + d_0.$$

Полином $\bar{N}_m(s)$ имеет вид

$$\bar{N}_m(s) = s^m + s^{m-1}(d_{m-1} + a) + s^{m-2}(d_{m-2} + d_{m-1}a) + \dots + s(d_1 + d_2 a) + ad_1.$$

Возникает вопрос, каким должен быть полином $N_m(s)$, чтобы полином $N(s)$, имел m корней, мало отличающихся от корней $N_m(s)$, и два корня $-\alpha \pm j\omega$, мало отличающихся от заданных корней $s_{01,2} = -\alpha_0 \pm j\omega_0$ расчетного полинома $N_{02}(s)$. Иными словами, полином $N_m(s)$, должен иметь корни, достаточно удаленные влево от начала координат комплексной плоскости корней, чтобы внутренний контур считать безынерционным.

Полином $N_m(s)$ формируется в процессе синтеза внутренних контуров, и должен удовлетворять условиям

$$|s_i| \in (\underline{\sigma}, \bar{\sigma}), \quad d_{i-1}/d_i \geq \underline{\sigma}/m, \quad (4)$$

Необходимое условие принадлежности корней полинома $N_m(s)$ сектору $\pi \pm \varphi_0$ для коэффициентов полинома имеет вид [4]

$$\frac{d_i^2}{d_{i-1}d_{i+1}} \geq \frac{(n-i+1)(i+1)}{(n-i)i} \left(1 - \frac{1}{3} \operatorname{tg} \varphi_0 \right), \quad (5)$$

$$(i = 0, 1, 2, \dots, m-1).$$

Корни $s_{1,2} = -\alpha_0 \pm j\omega_0$ полинома внешнего контура отображают желаемое качество системы, и могут изменяться внутри допустимой области при соблюдении условий

$$\frac{r_0}{\underline{\sigma}} \leq \varepsilon_0, \quad \frac{\bar{a}}{\underline{\sigma}} \leq \varepsilon_1 \leq \varepsilon_0. \quad (6)$$

Корни полинома (3) не совпадают с корнями входящих в него полиномов, но отличие тем меньше, чем меньше φ_0, ε_0 . В самом деле, учитывая выражение полинома (3) характеристическое уравнение замкнутой системы можно представить в виде

$$-s^2 \bar{N}_m(s) = d_0 N_{02}(s). \quad (5)$$

Если $s = s_{1,2} = -\alpha \pm j\omega$ и $r^2 = \alpha^2 + \omega^2 < \underline{\sigma}$, то полином $\bar{N}_m(s)$, принимает значение

$$|\bar{N}_m(s)| = (P^2 + Q^2)^{1/2} \leq \alpha_1 d_1,$$

учитывая чередование знаков слагаемых.

Выражение (5) полинома $N_{02}(s) = (s - s_{01})(s - s_{02})$ при значениях $s = s_{1,2} = -\alpha \pm j\omega$, дает

$$d_0(\alpha_0 - \alpha + j(\omega - \omega_0))(\alpha_0 - \alpha + j(\omega + \omega_0)) = -s_1^2 \bar{N}_m(s_1), \quad (6)$$

$$d_0(\alpha_0 - \alpha + j(-\omega - \omega_0))(\alpha_0 - \alpha + j(-\omega + \omega_0)) = -s_2^2 \bar{N}_m(s_2).$$

Таблица 1. Корни характеристических полиномов контуров регулирования (контурные нумеруются, начиная с внутреннего)

Номер контура	Порядок полинома контура	Значения корней при $\varepsilon = 0,1$	tg φ	Модуль минимальный
0	2	$s_1 = -10^3, s_2 = -10^3$	0	10^3
1	4	$10^3 * (-1,3332 - 0,4078 - 0,2284 - 0,0805)$	0	80,5
2	6	$10^3 * (-1,3333 - 0,4031 - 0,2425 - 0,0578 - 0,0133 - 0,0100)$	0	10
3	8	$10^3 * (-1,3333 - 0,4031 - 0,2425 - 0,0577 - 0,0156 - 0,0064 - 0,0013 - 0,0010)$	0	1,0
4	10	$10^3 * (-1,3333 - 0,4031 - 0,2425 - 0,057 - 0,0156 - 0,0064 - 0,0016 - 0,0006 - 0,0001 - 0,0001)$	0	0,1

Таблица 2. Корни характеристических полиномов контуров регулирования (параметры объекта вдвое меньше расчетных)

Номер контура	Порядок полинома контура	Значения корней при $\varepsilon = 0,1$	tg φ	Модуль доминирующего корня
0	2	$s_1 = -10^3, s_2 = -10^3$	0	10^3
1	4	$10^3 * (-1,2415 - 0,6782 - 0,0526 + 0,0563i - 0,0526 - 0,0563i)$	1,07	80,5
2	6	$10^3 * (-1,2416 - 0,6779 - 0,0472 + 0,0496i - 0,0472 - 0,0496i - 0,0081 + 0,0078i - 0,0081 - 0,0078i)$	1,07	11,5
3	8	$10^3 * (-1,2416 - 0,6779 - 0,0471 + 0,0496i - 0,0471 - 0,0496i - 0,0076 + 0,0071i - 0,0076 - 0,0071i - 0,0008 + 0,0007i - 0,0008 - 0,0007i)$	1,07	1,0
4	10	$10^3 * (-1,2416 - 0,6779 - 0,0471 + 0,0496i - 0,0471 - 0,0496i - 0,0076 + 0,0071i - 0,0076 - 0,0071i - 0,0007 + 0,0007i - 0,0007 - 0,0007i - 0,0001 + 0,0001i - 0,0001 - 0,0001i)$	1,07	0.14

Поскольку $|\Delta r|^2 = ((\alpha_0 - \alpha)^2 + (\omega - \omega_0)^2)$, перемножение выражений позволяет получить квадрат $\varepsilon^2 = (\Delta r/r)^2$ модуля $\varepsilon = \Delta r/r$ относительного изменения корней по сравнению с расчетными значениями. При $\omega_0 = 0$

$$(\Delta r)^2 / r^2 = d_0^{-1} |\bar{N}_m(s_i)| < a d_1 / d_0. \quad (7)$$

Поскольку в соответствии с (4) $d_1/d_0 < m/\underline{\sigma}$, то

$$(\Delta r)^2 / r^2 < m\varepsilon_0. \quad (8)$$

Таким образом, в двухконтурной системе допустимо пренебрежение инерционностью внутреннего контура, если внутренний контур имеет характеристический полином, удовлетворяющий условиям (4), (5) а регулятор внешнего контура формируется на основании равных действительных полюсов контура при соблюдении условия (6) и достаточно малом ε_0 .

Пример расчета для многоконтурной системы

В таблицах 1, 2 приводятся результаты расчета корней характеристических полиномов контуров в четырехконтурной системе с расчетными параметрами объекта $a_1 = 50, a_2 = 10, a_2 = 1,0, a_2 = 0,10$. В качестве расчетных при-

нимаются наибольшие значения из заданного интервала в соответствии с выражением (6). Значение индекса соответствует номеру контура.

На рис. 2 показаны значения корней характеристических полиномов контуров регулирования при $\varepsilon = 0,2$, соответствующие табл. 2. Круглым маркером показаны расчетные значения корней, а квадратным – при значениях параметров объекта, уменьшенных вдвое по сравнению с расчетными параметрами.

Результаты расчетов при $\varepsilon = 0,1$ в соответствии с табл. 1 показывают, что корни полиномов всех контуров действительные отрицательные, поэтому $\text{tg } \varphi = 0$. Если же параметры объекта во всех контурах уменьшаются вдвое по сравнению с расчетными значениями, появляются комплексные корни, принадлежащие ограниченному сектору с $\text{tg } \varphi = 1,07$.

При $\varepsilon = 0,2$ в соответствии с табл. 2 корни получаются комплексные, лежащие в секторе $\text{tg } \varphi = 1,88$. Если параметры объекта уменьшаются вдвое по отношению к расчетным значениям, как видно из рис. 2, корни не выходят за пределы сектора $\text{tg } \varphi = 2,0$ и вместе с тем максимум мнимых частей уменьшается.

В системе подчиненного регулирования при настройке контуров на модульный опти-

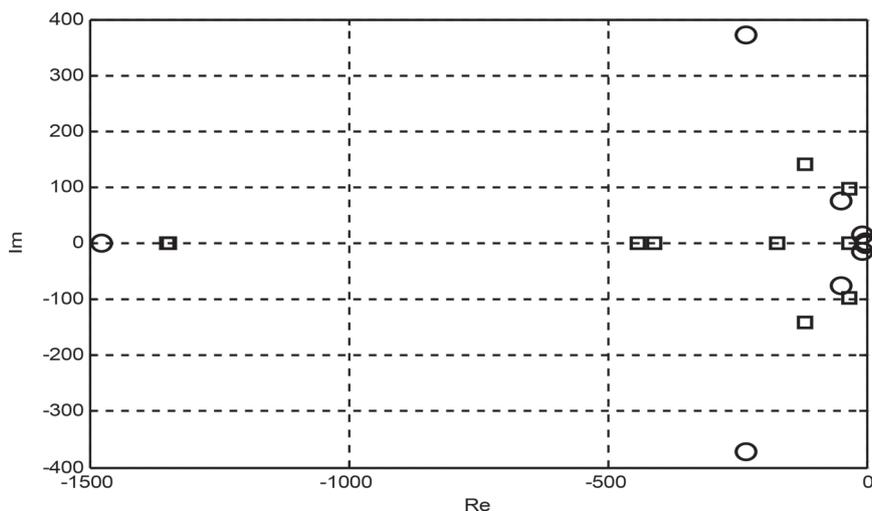


Рис. 2. Корни характеристических полиномов контуров регулирования при $\varepsilon = 0,2$

мум [1, 2] $\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3}/2$, однако при изменениях параметров некоторые из корней могут выйти за пределы сектора $\operatorname{tg} \varphi = 2,0$.

Заключение

Предложенный метод параметрического синтеза ПИ-регуляторов многоконтурной си-

стемы позволяет произвольно формировать показатели качества контуров и учитывать изменения параметров объекта, что является преимуществом.

Робастные свойства системы достигаются уменьшением величины ε , а, следовательно, ценой снижения быстродействия системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kessler C. Über die Vorausberechnung optimal abgestimmter Regelkreise. – Regelungstechnik, 1954, № 12. s. 274–281.
2. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями / О. В. Слежановский, Л. Х. Дацковский, И. С. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983. 256 с.
3. Naslen P. Polinomes normaux et critere algebrique d'amortissement (I). Automatisme, tome VIII, n 6, 1963.
4. Системы автоматического управления объектами с переменными параметрами. Инженерные методы анализа и синтеза. /Б. Н. Петров, Н. И. Соколов, А. В. Липатов и др.. М.: Машиностр., 1986. 256 с.
5. Кузовков Н. Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение. 1976.
6. Поляк Б. Т. Робастная устойчивость и управление. / Б. Т. Поляк, П. С. Щербаков. – М.: Наука, 2002. 303 с.
7. Опейко О. Ф. Синтез линейной системы на основании упрощенной модели объекта. // АиТ. 2005. № 1. С. 29–35.

Поступила 25.08.15

ОПЕЙКО О. Ф., BNTU

CASCAD CONTROL FOR PLANT WITH PARAMETER UNSERTAINTY

The cascade control is developed for the case of plant parameters uncertainty. The two loops system is considered with proportional- integrate (PI) controllers, such the parametric synthesis can be generalized for multi loops systems. The necessary quality of the system is achieved by the correct polynomial's roots location on a complex plane. The roots location is defined to achieve the low sensitivity of the system to plant's parameters variations. The multiples numerical examples are presented for developed method, which demonstrate the belonging of polynomials roots to the restricted area of left hand half of complex plane for various multi loops systems.

**ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING
AND
DECISION-MAKING**

УДК 697.1

ЛЕШКЕВИЧ В. В.

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ И ПРИВЕДЕННОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Белорусский национальный технический университет

Представлен вариант применения метода конечных элементов к расчёту температурных полей и приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий и разработанная на его основе компьютерная программа расчета. Приведены примеры расчета ограждающих конструкций.

Введение

Количество теплоты, проходящее через ограждения здания, является одним из основных показателей для подбора систем обеспечения микроклимата. Согласно [1] основные (трансмиссионные) потери теплоты через ограждающую конструкцию определяются по формуле:

$$Q = A(t_b - t_n)n/R_T, \text{ Вт}, \quad (1)$$

где A – площадь участка ограждающей конструкции, м^2 ; n – коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной ограждающей конструкции по отношению к наружному воздуху; t_b , t_n – расчетная температура внутреннего и наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; R_T – сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$.

Традиционный подход [2] упрощенно рассматривает наружную стену здания как плоскую многослойную стенку и предполагает определение сопротивления теплопередаче ее по следующей формуле:

$$R_T = \frac{1}{\alpha_b} + \sum_i \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_n}, \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}/\text{Вт}, \quad (2)$$

где α_b , α_n – соответственно, коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхностей ограждающей конструкции, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; δ_i – толщина i -го слоя стенки, м ; λ_i – коэффициент теплопроводности материала i -го слоя стенки, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Неоднородность конструкции стен (швы кладки, стыки с междуэтажными перекрытиями, оконные откосы, элементы крепления теплоизоляции и др.) вызывают повышенные потери теплоты в местах их расположения и, как правило, компенсировались за счет некоторого запаса тепловой мощности системы отопления здания. Проблемы пониженной температуры и промерзания отдельных участков стен решались конструктивно с последующей проверкой разработанных узлов на строящихся объектах.

Постоянное повышение цен на энергоресурсы и строительные материалы, повышение требований к качеству зданий требует снижения расхода материалов при одновременном повышении теплозащитных качеств ограждающих конструкций. Данные факторы требовали более точного определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций зданий, что привело к введению изменения № 5 к [2], а позднее и выходу актуализированной редакции ТКП «Строительная теплотехника» [3].

В [3] вводятся понятие теплотехнически однородной и теплотехнически неоднородной ограждающей конструкции, а также понятие приведенного сопротивления теплопередаче – величины, характеризующей теплозащитные свойства ограждающей конструкции в стационарных условиях теплопередачи, численно равной отношению разности температуры воздуха с внутренней и наружной сторон конструкции к усредненной по расчетной площа-

ди конструкции плотности проходящего через неё теплового потока. Усредненная по площади плотность теплового потока определяется на основании расчета стационарного температурного поля ограждающей конструкции.

Наиболее известной и распространенной в Республике Беларусь на данный момент методикой является [4], которая основана на методе конечных элементов и использовании для расчетов температурных полей ограждающих конструкций программного комплекса TEMPER3D. Основными недостатками программы TEMPER3D являются сложность построения исходной геометрической модели конструкции и ограничение рабочих версий программы в 160 тысяч узлов расчетной сетки, что часто заставляет прибегать к сильным упрощениям модели на сложных конструкциях современных зданий.

Нормативная документация [3] допускает использовать иные (кроме [4]) методики и программные комплексы.

Расчет температурного поля с помощью метода конечных элементов

Стационарное 3-мерное температурное поля фрагмента ограждающей конструкции, описывается уравнением

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

с граничными условиями III рода

$$\alpha_T (T_{\text{пов}} - T_{\text{ср}}) = -\lambda_T \frac{\partial T}{\partial n}, \quad (4)$$

где $T_{\text{пов}}$ – температура соответствующей поверхности ограждения, °C; $T_{\text{ср}}$ – температура среды, омывающей соответствующую поверхность, °C; T – искомая функция температуры, °C; λ_T – теплопроводность материала, Вт/(м·°C); α_T – коэффициент теплоотдачи соответствующей поверхности, Вт/(м²·°C).

Согласно теории метода конечных элементов [5] удовлетворению дифференциального уравнения (3) с граничными условиями (4) соответствует минимизация следующего функционала

$$\chi_T = \int \frac{1}{2} \left[\lambda_T \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \lambda_T \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \lambda_T \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] dV + \int \frac{\alpha_T}{2} [T - T_{\text{ср}}]^2 dS. \quad (5)$$

После преобразований, подробно изложенных в [6], приходим к выражению, удовлетворяющему минимуму функционала (5), в виде

$$[K^{(e)}] [T] + [F^{(e)}] = 0, \quad (6)$$

где

$$[K^{(e)}] = \frac{\lambda_T}{36V} \begin{bmatrix} b_i b_i & b_i b_j & b_i b_k & b_i b_l \\ b_j b_i & b_j b_j & b_j b_k & b_j b_l \\ b_k b_i & b_k b_j & b_k b_k & b_k b_l \\ b_l b_i & b_l b_j & b_l b_k & b_l b_l \end{bmatrix} + \frac{\lambda_T}{36V} \begin{bmatrix} c_i c_i & c_i c_j & c_i c_k & c_i c_l \\ c_j c_i & c_j c_j & c_j c_k & c_j c_l \\ c_k c_i & c_k c_j & c_k c_k & c_k c_l \\ c_l c_i & c_l c_j & c_l c_k & c_l c_l \end{bmatrix} + \frac{\lambda_T}{36V} \begin{bmatrix} d_i d_i & d_i d_j & d_i d_k & d_i d_l \\ d_j d_i & d_j d_j & d_j d_k & d_j d_l \\ d_k d_i & d_k d_j & d_k d_k & d_k d_l \\ d_l d_i & d_l d_j & d_l d_k & d_l d_l \end{bmatrix} + \frac{\alpha_T}{12} S [M_K];$$

$$[F^{(e)}] = -\frac{\alpha_T T_{\text{ср}}}{3} S [M_F];$$

$b_i, b_j, b_k, b_l, c_i, c_j, c_k, c_l, d_i, d_j, d_k, d_l$ – вычисляются по значениям координат узлов тетраэдра; V – объем тетраэдра; (e) – индекс показывающий, что величина относится к конечному элементу; S – площадь грани тетраэдра, омываемая воздухом, м²; $[M_K], [M_F]$ – матрицы коэффициентов:

$$\text{при } S = S_{jkl} \quad M_K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad M_F = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\text{при } S = S_{ikl} \quad M_K = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad M_F = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\text{при } S = S_{ijl} \quad M_K = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \quad M_F = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\text{при } S = S_{ijk} M_K = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, M_F = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix};$$

Вычислив матрицы $[K^{(e)}]$, $[F^{(e)}]$ для каждого конечного элемента применяем процедуру ансамблирования, представляющую собой объединение матриц $[K^{(e)}]$, $[F^{(e)}]$ отдельных элементов в глобальные матрицы $[K]$, $[F]$ всей конструкции. Значения температуры $[T]$ в узлах находятся из выражения $[K][T] + [F] = 0$ при известных $[K]$, $[F]$.

Практическая реализация

Расчет стационарного температурного поля ограждения выполняется в следующей последовательности: задание геометрической модели; ввод исходных данных (граничные условия и характеристики материалов); построение расчетной сетки; построение матриц элементов; построение глобальных матриц (ансамблирование); решение полученной системы уравнений; обработка и анализ полученных данных.

Построение расчетной сетки является довольно трудоемкой задачей, требующей отдельных исследований. Поэтому принято решение об использовании готовых генераторов сеток. Одним из наиболее оптимальных вариантов для решения данной задачи является Gmsh [7].

Таким образом, задача практической реализации метода свелась к реализации вычислительного блока, позволяющего загружать в память расчетную сетку, выполнять построение соответствующих матриц, выполнить решение СЛАУ, а также производить постобработку полученного решения (вычисление средней температуры поверхностей и средней плотности теплового потока).

Вычислительный блок разработан на интерпретируемом языке программирования Python в виде отдельных пакетов в соответствии с назначением каждого из них: boundary – загрузка и обработка граничных условий; material – загрузка и обработка физических свойств материалов; mesh – загрузка и обработка расчетной сетки; ensemble – построение матриц для конечных элементов, ансамблирование, решение системы линейных алгебраических

уравнений; postpro – вычисление средней плотности теплового потока и сохранение данных расчета.

С целью ускорения разработки и уменьшения времени выполнения расчетов использовались библиотеки NumPy и Scipy [8], созданные с использованием компилируемых языков программирования, что существенно повышает скорость работы с массивами данных. Для ускорения вычислений на современных ПК задача выполняется в нескольких потоках, для чего используется Parallel Python Software [9]. Решение результирующей системы уравнений выполняется по численному алгоритму MINRES [8], предварительное обуславливание матрицы теплопроводности выполняется с помощью пакета Pyamg [10]. Разработка и расчеты выполнялись в операционной системе Debian GNU/Linux.

Опыт практического применения

В качестве примера представлены исходные данные и полученное температурное поле узла сопряжения междуэтажного перекрытия с железобетонной колонной каркаса здания с примыкающим к ним фрагментом самонесущей кладки из керамических блоков, утепленной минераловатными плитами и установленной в ней двери выхода на лоджию.

На рис. 1 представлен фрагмент плана здания с указанием места расположения узла сопряжения конструкций, температурное поле которого рассчитывается. На рис. 2 показана геометрическая модель рассчитываемого узла со стороны лоджии (а) и помещения (б). Расчетные температуры наружного и внутреннего воздуха в данном примере приняты $t_H = -26^\circ\text{C}$ и $t_B = +18^\circ\text{C}$. Теплофизические характеристики материалов приняты по [3]. Расчетная сетка имеет 675616 узлов, количество конечных элементов (тетраэдры) – 4151149.

На рис. 3 представлено полученное в результате расчета температурное поле узла сопряжения конструкций. Визуализация температурного поля выполнена с помощью программы Gmsh.

По результатам расчета плотность теплового потока через грань помеченную '1*' (см. рис. 2) составила $7,332 \text{ Вт/м}^2$, а сопротивление теплопередаче данного участка:

$$R_T = (18 - (-26))/7,332 = 6,001 \text{ (м}^2\cdot\text{C)/Вт. (7)}$$

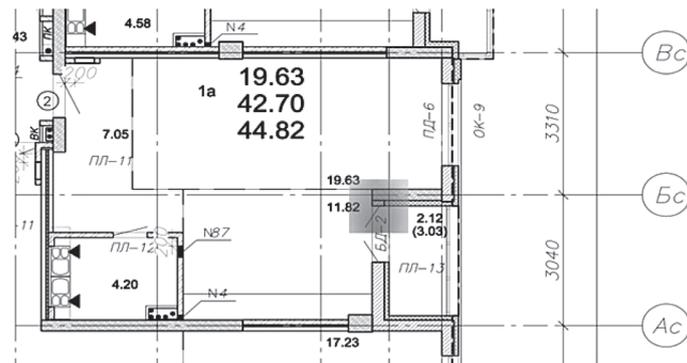


Рис. 1. Фрагмент плана здания с указанием рассчитываемого узла сопряжения (выделено серым прямоугольником)

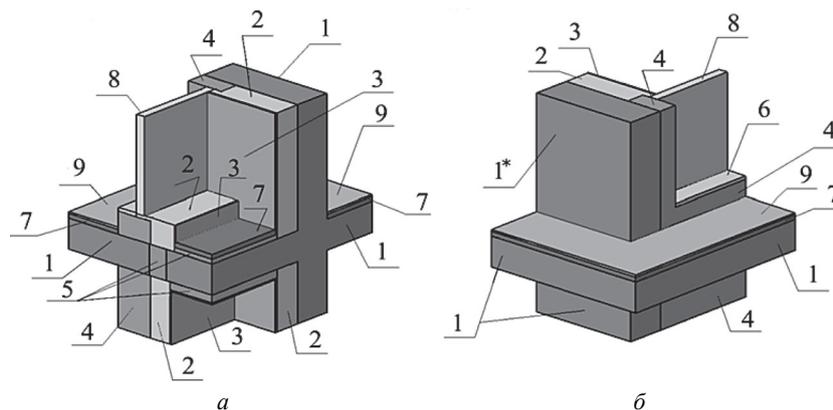


Рис. 2. Геометрическая модель узла сопряжения междуэтажного перекрытия, колонны, участка самонесущей кладки, двери выхода на лоджию: *а* – вид со стороны лоджии; *б* – вид со стороны помещения; 1 – железобетон (несущий каркас); 2 – минераловатная плита; 3 – защитная штукатурка; 4 – вкладыши из пенополистирола; 6 – теплоизоляционный вкладыш; 7 – цементно-песчаная стяжка; 8 – заполнение светового проёма (дверь на лоджию); 9 – покрытие пола

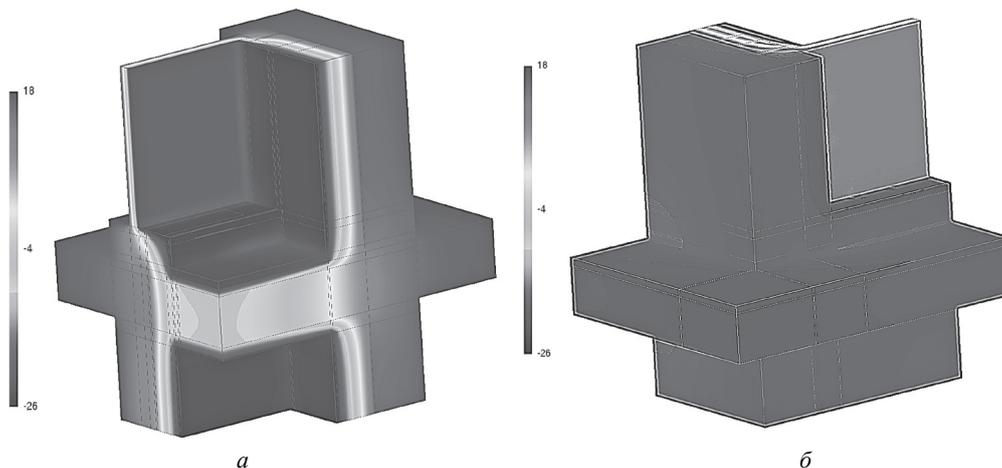


Рис. 3. Температурное поле рассматриваемого узла сопряжения строительных конструкций: *а* – вид со стороны лоджии; *б* – вид со стороны помещения

Аналогичным образом вычисляются значения сопротивления теплопередаче для других участков ограждений, после чего определяется приведенное сопротивление теплопередаче наружных стен всей части здания, оборудованной отдельным прибором учета тепловой энергии (в данном случае – жилой квартиры).

Максимально возможное количество узлов и конечных элементов теоретически ограничено только аппаратными возможностями используемой ЭВМ. Экспериментальным путем достигнуто количество 10 700 000 узлов. Большее количество узлов не проверялось в связи с отсутствием необходимости.

Заключение

Описана математическая модель и представлена программа для выполнения расчёта 3-мерного стационарного температурного поля фрагментов ограждающих конструкций зданий. Использование мощного генератора сеток позволяет выполнять расчёты температурных полей узлов сопряжения конструкций высокой сложности, ограниченной на данный момент только возможностями по-

строения соответствующей геометрической модели оператором. Это приводит к повышению точности расчётов при наличии конструктивных элементов с малыми линейными размерами (тонкие слои металла в кронштейнах крепления вентилируемых фасадов, легкие стеновые панели с каркасом из металлического профиля и др.) в связи со снижением степени упрощения исходной модели конструкции.

Литература

1. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СНБ 4.02.01–03. – Введ. 01.01.05. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2004. – 78 с.
2. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43-2006. – Введ. 01.07.07. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2007. – 32 с.
3. Строительная теплотехника. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-2.04-43-2006*. – Введ. 01.07.07. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2015. – 47 с.
4. Рекомендации по расчёту приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций и расчёту потерь теплоты через ограждения: Р 1.04.115.13. – Введ. 14.10.13. – Минск: Институт жилища – НИПТИС им. Атаева С. С., 2013. – 61 с.
5. Зенкевич, О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган; Перевод с английского под ред. Н. С. Бахвалова. – Москва: Мир, 1986. – 318 с.
6. Лешкевич, В. В. Расчёт температурного поля многослойных ограждающих конструкций с теплопроводными включениями методом конечных элементов / В. В. Лешкевич, А. М. Протасевич // Энергоэффективность. – 2013. – № 10(192). – С. 16–20.
7. Geuzaine, C. Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities / C. Geuzaine, J.-F. Remacle // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2009. – № 79(11). – P. 1309–1331.
8. Bressert, E. SciPy and NumPy / E. Bressert. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2012. – 68 с.
9. Vanovschi, V. Parallel Python Software / V. Vanovschi // Parallel Python Software [Электронный ресурс]. – 2014. – Режим доступа: <http://www.parallelpython.com>. – Дата доступа: 14.08.2015.
10. Bell, W. N. PyAMG: Algebraic Multigrid Solvers in Python / W. N. Bell, L. N. Olson, J. Schroder // PyAMG: Algebraic Multigrid Solvers in Python [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://www.pyamg.org>. – Дата доступа: 14.08.2015.

Поступила 25.06.15

Liashkevich U. U.

CALCULATION OF THE THERMAL FIELD AND THE THERMAL RESISTANCE OF BUILDINGS ENVELOPES USING THE FINITE ELEMENT METHOD

The method of calculation the thermal field and the thermal resistance of fragments of building envelope and developed computer calculating program are described in the article «Calculation of the thermal field and the thermal resistance of buildings envelopes using the finite element method». The main logical modules of the program are described. An example of calculation of temperature field and of the thermal resistance of element of monolithic frame building is given.

ЗОЛОТАРЕВ С. А., МИРЗАВАНД М. А.

ТРЕХМЕРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ SART С МИНИМИЗАЦИЕЙ ТОТАЛЬНОЙ ВАРИАЦИИ

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Белорусский национальный технический университет

Компьютерная томография продолжает интенсивно исследоваться и широко используется для решения ряда промышленных и медицинских задач. Алгебраический метод реконструкции с одновременными итерациями SART рассматривается в данной работе как один из перспективных итерационных методов, пригодных для решения томографических задач. Для ускорения быстрогодействия используется графический процессор. Метод минимизации тотальной вариации (TV) используется как априорная поддержка для регуляризации итерационного процесса и преодоления неполноты информации.

Введение

Маммография является одним из самых надежных методов выявления рака молочной железы. При обычной скрининговой маммографии производятся снимки каждой молочной железы в 2-х проекциях – прямой (*cranial-caudal*, CC) и косой (*mediolateral-oblique*, MLO). Цифровая томографическая маммография (ЦТМ) является многообещающей технологией, которая может обеспечить трехмерную структурную информацию с помощью реконструкции трехмерного изображения молочной железы из набора двухмерных проекционных маммограмм [1,2]. Как было показано в работах [3] ЦТМ может значительно сократить эффект «камуфляжа» от перекрытия тканей молочной железы и улучшить выявление поврежденных участков. В настоящее время ряд производителей маммографических систем разработали прототипы томографических маммографов и проводят их клинические испытания с целью определения преимуществ, которые они могут обеспечить в сравнении с обычной цифровой маммографией. Концепция использования для целей томографической маммографии технологии обычного томосинтеза была предложена в работе [4]. Позже это направление было развито в работах [5] Однако, следует заметить, что можно обеспечить улучшенное качество реконструкции с помощью использования передовых реконструктивных томографических алгоритмов.

Реконструкция трехмерного цифрового изображения сжатой молочной железы является, по сути, конической томографией с ограниченным углом обзора. Существующие методы реконструкции для решения таких задач можно разделить на следующие четыре категории: 1) метод фильтрованных обратных проекций (FBP); 2) методы интегральных преобразований; 3) методы алгебраической реконструкции (ART) и 4) статистические реконструктивные алгоритмы. Нами был выбран алгебраический метод реконструкции с одновременными итерациями SART [6]. Эффективность его использования была проверена путем реконструкции медицинского маммографического фантома. Распараллеливание алгоритма реконструкции было основано на использовании графической библиотеки OpenGL. Экспериментальные рентгеновские проекции были сняты на маммографе фирмы Сименс Mammomat Novation DR в отделении лучевой диагностики ГУ НИИ ОМР им. Н. Н. Александрова (Боровляны).

Основная часть

Алгебраический метод реконструкции с одновременными итерациями SART

Алгебраические реконструкционные методы, такие как ART и связанный с ним алгебраический метод реконструкции с одновременными итерациями SART, реконструируют двухмерные или трехмерные объекты по рентгеновским проекциям. Алгебраические методы

в определенных случаях имеют значительные преимущества по сравнению с более популярным методом FBR. Однако низкая скорость сходимости итерационных методов не позволяет их использовать во многих важных для практики случаях. Можно преодолеть этот недостаток с помощью использования двухмерных текстурных отображений, которые легко осуществить на обычных графических видеокартах с использованием библиотеки OpenGL.

Томографическая реконструкция с использованием алгебраических методов сводится к решению следующей системы алгебраических уравнений

$$P_i = \sum_{j=1}^N w_{ij} v_j \quad (1)$$

Мы должны восстановить значения v_j в $N=n^3$ вокселях, принадлежащих области реконструкции, где индекс j пробегает значения от 1 до N , с помощью использования значений p_i в пикселях с текущим индексом i , принадлежащих проекционным изображениям P_ϕ , где угол ϕ который характеризует геометрическую ориентацию пары источник-детектор для которой осуществлялось просвечивание. Здесь подразумевается круговая траектория движения источника вокруг объекта. В уравнении (1), w_{ij} является весовым коэффициентом, с которым воксель с индексом j вносит свое значение в пиксель с индексом i . SART решает эту систему уравнений итерационным способом, при котором коррекция значения в j -ом вокселе, для всех вокселей, принадлежащих области реконструкции, производится одновременно на текущей итерации с номером k , как указано далее в формуле (2):

$$v_j^{(k)} = v_j^{(k-1)} + \lambda \frac{\sum_{p_i \in P_\phi} \left(\frac{p_i - \sum_{l=1}^N w_{il} v_l^{(k-1)}}{\sum_{l=1}^N w_{il}} \right)}{\sum_{p_i \in P_\phi} w_{ij}} \quad (2)$$

Прямое проецирование реконструируемого трехмерного изображения осуществляется с использованием двухмерных текстурных отображений, которые были реализованы на графической видеокarte NVIDIA GeForce GTX 470 с 1280 Mb текстурной памяти путем использования библиотеки OpenGL. Реконструи-

руемое трехмерное изображение разделяется на n слоев и каждый слой обрабатывается отдельно. При проецировании изображения объекта реконструкции каждый его слой ассоциируется с квадратным полигоном, на который накладывается двумерная текстура, представляющая собой значения коэффициента ослабления в соответствующем слое объекта. Повернув полигон, с наложенной на него текстурой, на угол геометрического положения источника излучения ϕ и осуществив перспективное проецирование с углом конического источника γ , мы тем самым отображаем воксели, лежащие в рассматриваемом слое реконструируемого объема, взвешенные соответствующим образом, на пиксели проекционного изображения. После того как проекции n текстурных полигонов будут накоплены в буфере кадра, он будет содержать проекцию реконструируемого изображения для проекционного угла ϕ .

Во время выполнения обратного проецирования, необходимо наложить рассчитанное корректирующее изображение на слои изображения реконструируемого объекта. Это достигается с помощью ассоциации каждого слоя объекта, одного за другим, с экраном, на который проецируется корректирующее изображение, предварительно преобразованное в текстуру и наложенное на полигон.

Следует заметить, однако, что в отличие от предыдущего случая главная видовая ось уже не является больше перпендикулярной экрану, и она не всегда пересекает центр экрана. Хотя графическая библиотека OpenGL не позволяет видовой оси быть наклонной по отношению к экрану, но мы можем обойти это, если будем использовать проективные текстуры, описанные Сегалом [7], которые работают в качестве проецируемых слайдов. В противоположность прямому проецированию корректирующее изображение теперь, во-первых, перспективно проецируется на полигон, который помещается в местоположение слоя объекта и который должен получить корректирующую поправку. Корректирующее изображение, спроецированное на полигон, после этого повторно проецируется в буфер кадра с помощью ортографической проекции и объединяется с корректируемым слоем.

Понятно, что для того, чтобы получить максимальное быстродействие за счет исполь-

зования графических ускорителей нужно все операции выполнять внутри текстурной памяти видеокарты, поэтому мы будем использовать алгоритм, который обеспечивает выполнение всех шагов трехмерной томографической реконструкции с использованием только текстурной памяти видеокарты [8].

Минимизация тотальной вариации

Минимизация тотальной вариации (TV) – это метод нелинейного обесшумливания изображений путем минимизации TV изображения с помощью градиентного спуска. Модель анизотропной тотальной вариации для удаления шума в исходном изображении f может

быть представлена как задача минимизации выражения:

$$\min_u \left[\|\nabla_x u\|_1 + \|\nabla_y u\|_1 + \frac{\mu}{2} \|u - f\|_2^2 \right], \quad (3)$$

где μ соответственно выбранный положительный параметр, здесь

$$\|u\|_p = \left(\sum_{1 \leq i, j \leq N} |u(i, j)|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (4),$$

для $1 \leq p < \infty$.

Итерационная схема обеспечивает сходимость последовательности u^k к искомому изображению u^* , представляющему собой «обес-



Рис. 1. Рентгеновская проекция фантома Mammography BR3D Phantom для 0°

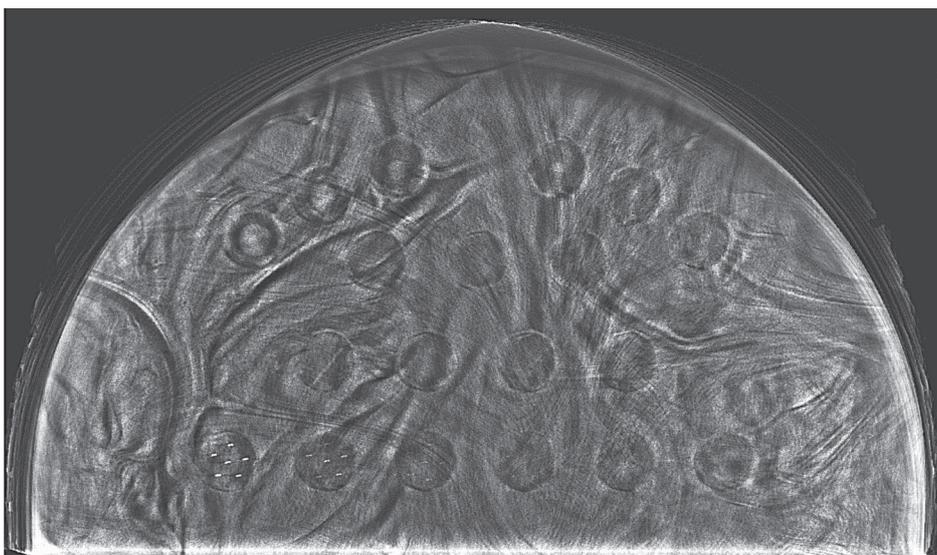


Рис. 2. Слой 83 реконструированного без априорной поддержки изображения фантома Mammography BR3D Phantom

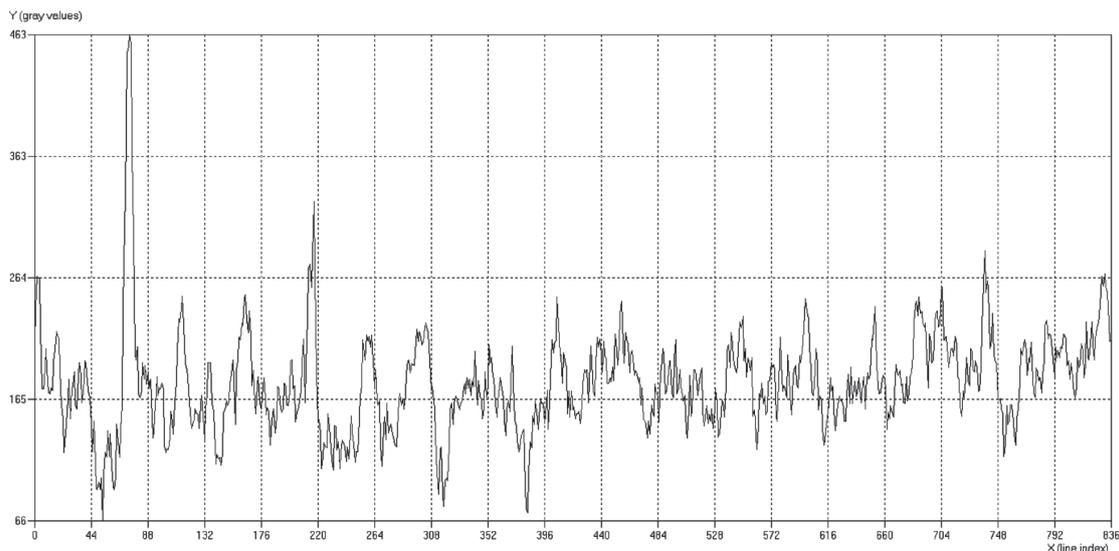


Рис. 3. Профиль для строки 883 на слое 83 реконструированного без априорной поддержки изображения фантома Mammography Phantom BR3D

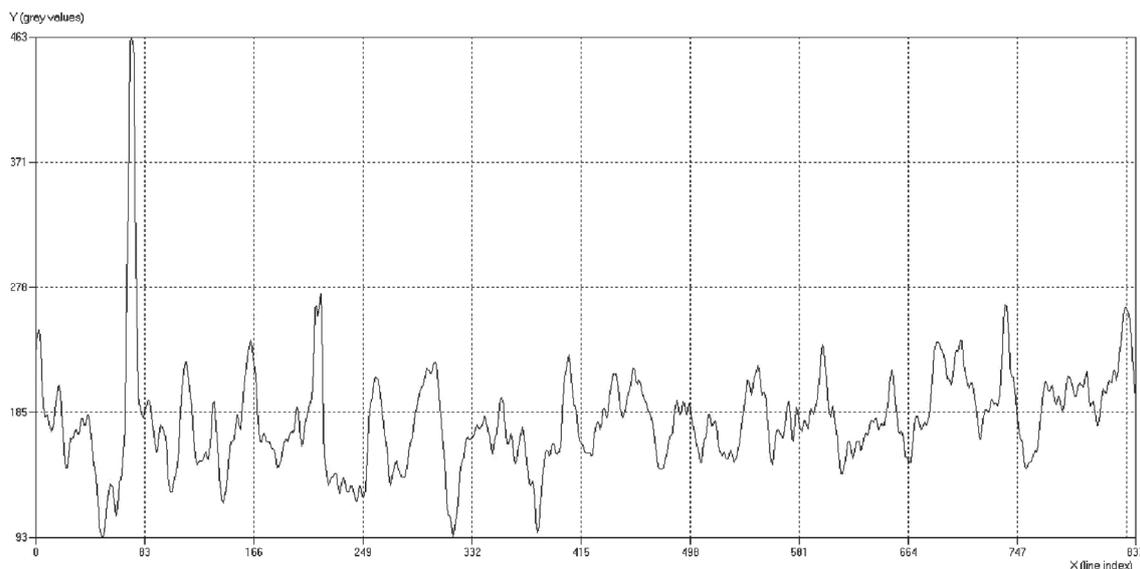


Рис. 4. Профиль для строки 883 на слое 83 реконструированного с априорной поддержкой изображения фантома Mammography Phantom BR3D

шумленое» изображение $f[9]$, где λ –положительный параметр, который используется в итерационном процессе.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} u^k = u^* \text{ если } 0 < \lambda/\mu < 1/8.$$

Экспериментальные результаты

На рис. 1, 2 показаны рентгеновская проекция для угла 0° и горизонтальный слой трехмерного изображения, реконструированного без априорной поддержки. На рис. 3, 4 приведены профили слоев трехмерных изображений.

Время реконструкции трехмерного изображения размерностью $2048 \times 2048 \times 128$ вокселей составило 20 секунд.

Заключение

В статье предложен разработанный авторами алгоритм реконструкции трехмерных изображений для круговой схемы сканирования в коническом пучке рентгеновских лучей.

Показано, что с помощью использования графического процессора и библиотеки OpenGL можно более чем на порядок повысить быстродействие алгоритма, а одновременное ис-

пользование регуляризации методом анизотропной тотальной вариации обеспечило значительное сокращение шумовой составляющей при одновременном сохранении хорошего контраста реконструируемого изображения даже для углового обзора 40° .

Литература

1. **Niklason L. T.** Digital tomosynthesis in breast imaging. / L. T. Niklason // Radiology –1997.– v.205.– P. 399–406.
2. **Wu T.** Tomographic mammography using a limited number of low-dose cone-beam projection images / T. Wu // Med. Phys –2003.– v.30. – P. 365–380.
3. **Kopans D.** Digital tomosynthesis and other applications / D. Kopans // RSNA Program Book 2005 –2005.– P. 130.
4. **Ziedses des Plante, B. G.** Eine neue methode zur differenzierung in der roentgenographie (planigraphie) / B. G. Ziedses des Plante // Acta Radiologica –1932.– v.13.– P. 182–192.
5. **Dobbins J. T., Godfrey D. J.** Digital X-Ray Tomosynthesis: current state of the art and clinical potential / J. T. Dobbins, D. J. Godfrey // Phys. Med. Biol. – 2003.–v.48. –P. 65–106.
6. **Andersen A. H.** Algebraic reconstruction in CT from limited views / A. H. Andersen // IEEE Trans. Med. Imag. – 1989. – Vol. 8. – P. 50–55.
7. **Segal M.** Fast shadows and lighting effects using texture mapping / M. Segal, C. Korobkin, R. van Widenfelt, J. Foran, and P. E. Haeberli // SIGGRAPH'92. – 1992. – Vol. 26. – P. 249–252.
8. **Венгринович В. Л.** Итерационные методы томографии / В. Л. Венгринович, С. А. Золотарев // Минск: «Белорусская наука», – 2009. – 227 с.
9. **Jia R. Q.** A fast algorithm for the total variation model of image denoising / H. Q. Zhao // Adv. Comput. Math. –2010.– v.33.– P. 231–241.

Поступила 12.06.15.

S. A. ZOLOTAREV, M. A. MIRZAVAND

THREE-DIMENSIONAL RECONSTRUCTION BY SART METHOD WITH MINIMIZATION OF THE TOTAL VARIATION

Computed tomography is still being intensively studied and widely used to solve a number of industrial and medical applications. The algebraic reconstruction method with simultaneous iterations SART considered in this work as one of the most promising of iterative methods, suitable for the tomographic problems. Graphics processor is used to accelerate the speed of the reconstruction. The method of minimizing the total variation (TV) is used as a priori support for the regularization of the iterative process and to overcome the incompleteness of the information.

ПУЗАНОВ А. В.

ПРИНЦИП ПОСТПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОПРИВОДОВ

ОАО «Специальное конструкторское бюро приборостроения и автоматики»

В работе актуализирована проблема конструкторско-технологической подготовки производства гидроприводов. Проанализированы структура и бизнес-процессы проектирования и производства. Предложены методы и средства реорганизации проектных работ с целью сокращения времени подготовки производства. Сформулированы направления реорганизации процесса проектирования. Рассмотрен принцип проведения процедур конструкторско-технологической подготовки производства гидроприводов с использованием готовых элементов производственного цикла. Предложена схема их практической реализации на машиностроительном предприятии. Приведена оценка роста эффективности конструкторско-технологической подготовки производства на машиностроительном предприятии.

Введение

В процессе реализации «Стратегии развития корпорации Ростех на период до 2020 года», «Программы инновационного развития корпорации Ростех на 2011–2020 годы», а также принимая во внимание «Стратегию развития отрасли информационных технологий в Российской Федерации на 2014–2020 годы и на перспективу до 2025 года», руководством компании ОАО «СКБ ПА» взят курс на целевое повышение объемов производства на 15–20% ежегодно при сохранении численности персонала, в т. ч. конструкторов и технологов, повышение объемов подготовки производства с использованием совершенных инструментов автоматизации конструкторско-технологической подготовке производства (КТПП).

Основными направлениями совершенствования процессов КТПП на ближайшие годы являются:

- приоритет использования трехмерных моделей на ранних этапах конструкторской разработки;
- наполнение и совершенствование баз знаний, применяемых в КТПП;
- развитие и использование специализации производств по логистическим приоритетам.

Одним из путей решения данных задач в отрасли гидроприводостроения, с точки зрения автора, является повышение эффективности ин-

формационного пространства КТПП гидроприводов. Процесс производства изделия связан с результатами его проектирования длительностью процесса отработки (согласования) на технологичность изготовления. Оптимизация процесса приводит к необходимости информационных систем поддержки жизненного цикла изделий (ИП ЖЦИ). Предлагаемый автором принцип организации процесса конструкторско-технологической подготовки производства является частью орг-тех мероприятий в рамках ИП ЖЦИ [1], призван в значительной степени сократить сроки выпуска продукции, прогнозировать себестоимость продукции, нормировать прибыль, обоснованно участвовать в тендерах различного уровня, планировать развитие предприятия, формировать кадровую политику.

Структурное исследование информационной системы на предмет ее эффективности или для изучения вариантов ее трансформации связано с изучением разнородных бизнес-процессов, описывающих жизненный цикл изделия. Для этих задач применяется методология и инструменты функционального моделирования (по стандарту IDEF – методологии семейства ICAM (Integrated Computer-Aided Manufacturing)), позволяющие исследовать структуру, параметры и характеристики процессов в производственно-технических и организационно-экономических системах.

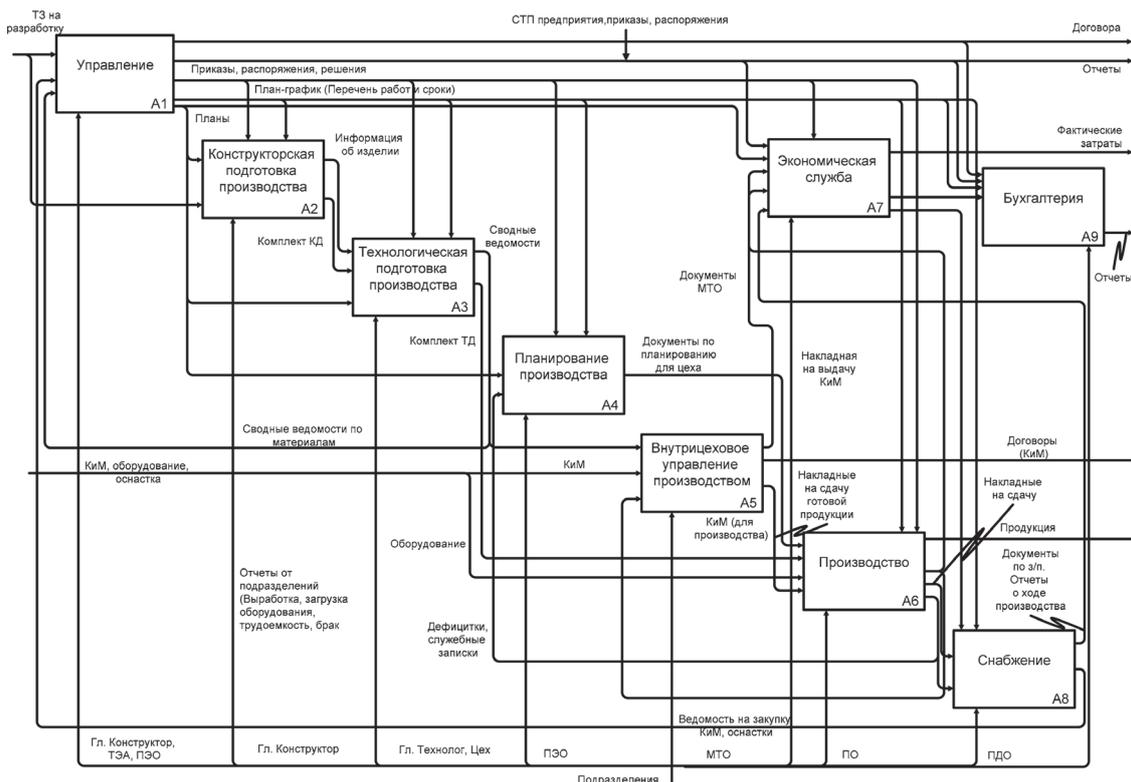


Рис. 1. Функциональная диаграмма КТПП

На Российском правовом просторе методология функционального моделирования регламентирована ГОСТ Р 50.1.028-2001.

Для достижения поставленных целей была разработана и проанализирована IDEF0 модель КТПП (рис. 1).

По результатам анализа диаграммы бизнес-процессов КТПП, исследован и формализован механизм процедур проектных работ, технологической подготовки и производства.

Предлагаемый постпроизводственный (разработка на основе произведенного) принцип формирования и реализации проектных процедур заключается в построении объекта проектирования на основе блочно-модульного принципа. В основу этого принципа автоматизации положен термин «конструктивно-технологический элемент» (КТЭ). Данный термин определяет в конструктиве признаки технологического перехода и используется для формирования техпроцесса [2, 3].

Автором предлагается расширить базовое понятие КТЭ, добавив в него дополнительную информацию о разработке, используемой технологии производства и оборудовании, времени разработки и производства, экспериментальные данные и сопутствующую информа-

цию по мере прохождения изделия по стадиям жизненного цикла. Реализуя данный принцип, к конструкторской 3D модели изделия привязывается вспомогательная информация технологического, производственного, организационного и финансового характера.

Принцип построения изделия в данном случае похож на конструктор Lego: при небольшом ассортименте элементов окончательное изделие выглядит функционально ограниченным. Однако, при определенном конечном увеличении набора КТЭ возможно построение как традиционных, так и инновационных решений, модернизации существующих. При подобном описании покупных или заимствованных компонентов возможно создание виртуальных конструктивных исполнений изделий.

Первичное образование КТЭ формируется из базы данных адаптивных конструктивных элементов, прошедших процедуру согласования/отработки технологичности, занесенных в базу разрешенных к применению элементов, имеющих связанную информацию о применяемых типовых технологических операциях/переходах и средствах оснащения, а также соответствующие им математические модели, в том

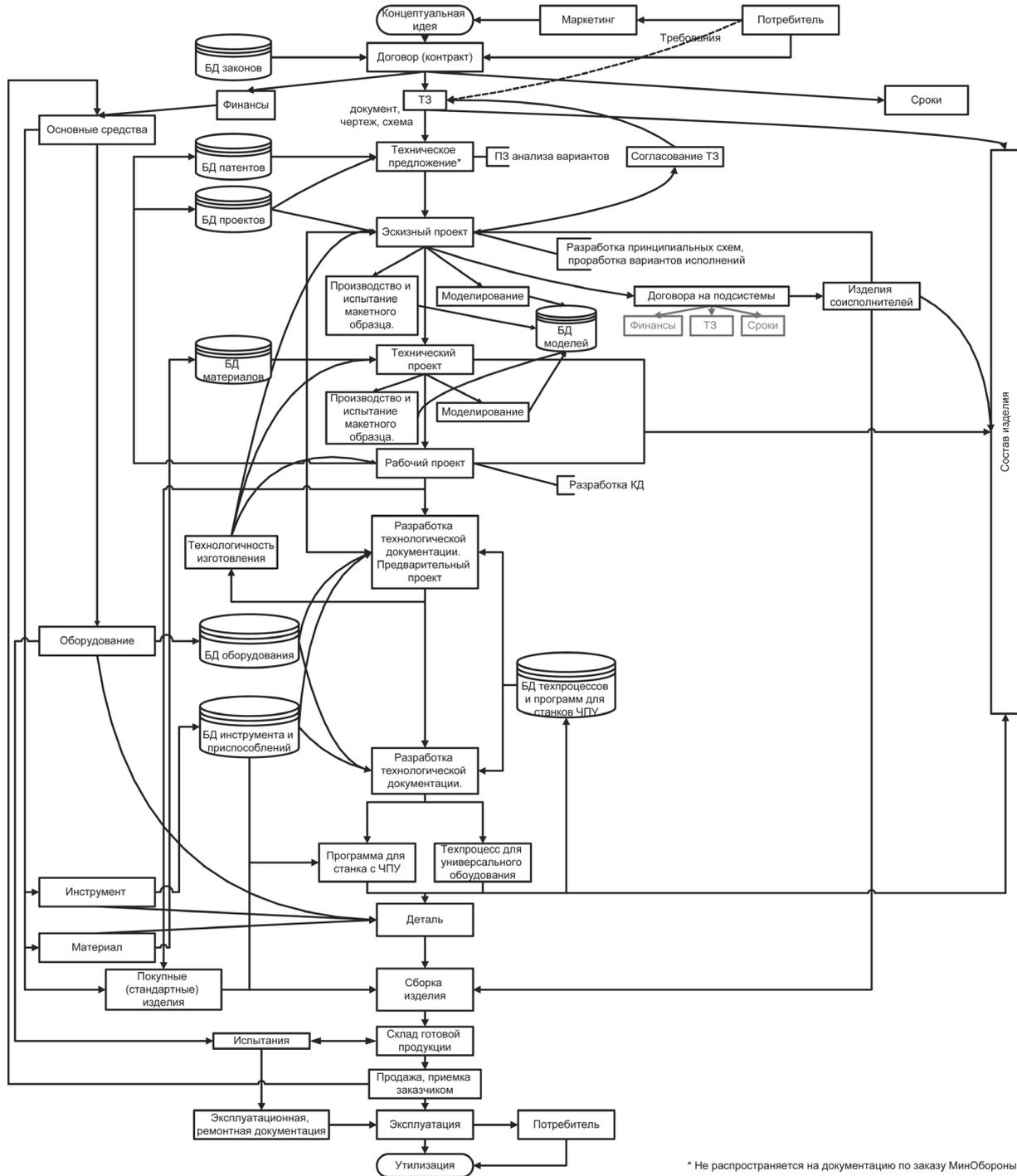


Рис. 2. Блок схема информационных потоков КТПП

числе подтвержденные натурными экспериментами. Основная часть БД КТЭ сформирована на предприятии за годы работ и представляет собой структурированное представление традиций проектирования и производства на данном предприятии. Следует отметить, что существует необходимость в КТЭ «временного» характера – для опытных и эксперимен-

тальных образцов с целью отработки технологичности их производства.

Математически, информационно-логическая модель изделия из КТЭ строится на основе древовидной структуры (принцип и-или графа, расширенного до и-или дерева) с нечеткой логикой при неполной информативности компонентов (рис. 3). Данный инструмента-

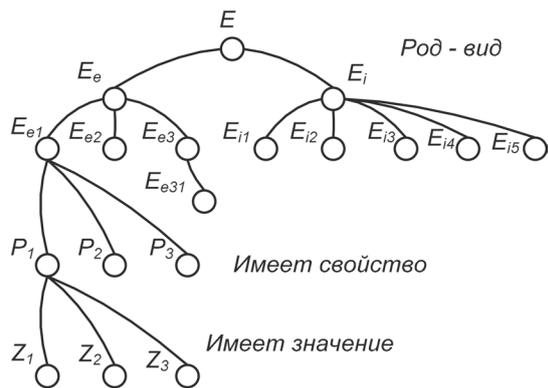


Рис. 3. Иерархическое представление КТЭ

рий позволяет анализировать заимствование части древ в новых изделиях, интерполяцию и экстраполяцию информативных пробелов в инфологических моделях на основе принципов аналогии и подобия, проведение оптимизационных процедур, для экономического логистического анализа, а также для автоматиче-

ского и полуавтоматического синтеза элементов ГП.

Древовидная структура отражает принципы классификатора ЕСКД, используемого на предприятиях отрасли.

Практическая реализация постпроизводственного принципа проектирования осуществлялась посредством локальной доработки САД-систем в сотрудничестве с ОДО «Интермех» (г. Минск) с поэтапным внедрением в процесс КТПП АРМ, отражающих специфику и традиции проектных и производственных работ и взаимоотношений подразделений. В нашем случае [1] подобный подход обеспечивает функционирование структуры, отображенной на рис. 4.

Процесс и все информационные потоки реализуются посредством специализированных программных средств, образующих в совокупности корпоративную информационную



Рис. 4. Схема взаимодействия программных средств в информационном пространстве на стадии конструирования

систему (рис. 4). Центральное место в архитектуре занимает подсистема управления проектными данными Search.

Проведение проектных процедур по готовым элементам производственного цикла стало возможным благодаря единому информационному пространству (единых баз данных конструкторской и технологической информации).

Для адаптации баз данных НСИ и КТЭ на предприятии была проведена работа по актуализации и применимости (неприменимости) содержимого баз данных к конкретной структуре предприятия (департамента отрасли).

Ключевым звеном автоматизации КТПП является база знаний и НСИ, реализованная в нашем случае на основе программного средства IMBase. Система управления данными об изделии и единый справочник материалов является базовым фундаментом, на котором основана вся информационная система предприятия.

На рисунке приведен пример заимствования в качестве конструктивного элемента штуцера с радиальным уплотнением.

Конструктор приблизительно очерчивает внешний облик конструкции (в рамках нисходящего процесса внешние габариты уже заданы). Далее запускается стартует процедура поиска прототипа по БД готовых конструкций и КТЭ. Выбрав прототип, конструктор вносит

изменения значений в параметрическую 3D-модель в соответствии с разрешенными к применению КТЭ – тем самым получается окончательный облик изделия. При использовании КТЭ в качестве конструктивных особенностей, приоритет отдается КТЭ с наибольшим значением «степени достоверности» из ИЛМ изделия.

Посредством прямой интеграции модуля конструкторской проработки изделия Cadmesh с единым корпоративным справочником предприятия, в едином информационном пространстве организован ограничительный перечень предприятий по стандартным и прочими изделиям, по готовым конструкторско-технологическим элементам, для использования в процессе проектирования.

Производственно-технологическая база – основа КТЭ. Программной средой технологической подготовки производства на всех кооперирующих предприятиях является система Techcard.

Для связи документации КТПП с финансовыми и планово-экономическими подразделениями при внутренней и внешней отраслевой интеграции доработан модуль экспорта/импорта, обеспечивающий указанные связи между системами управления производством и системой управления данными об изделии «Search».

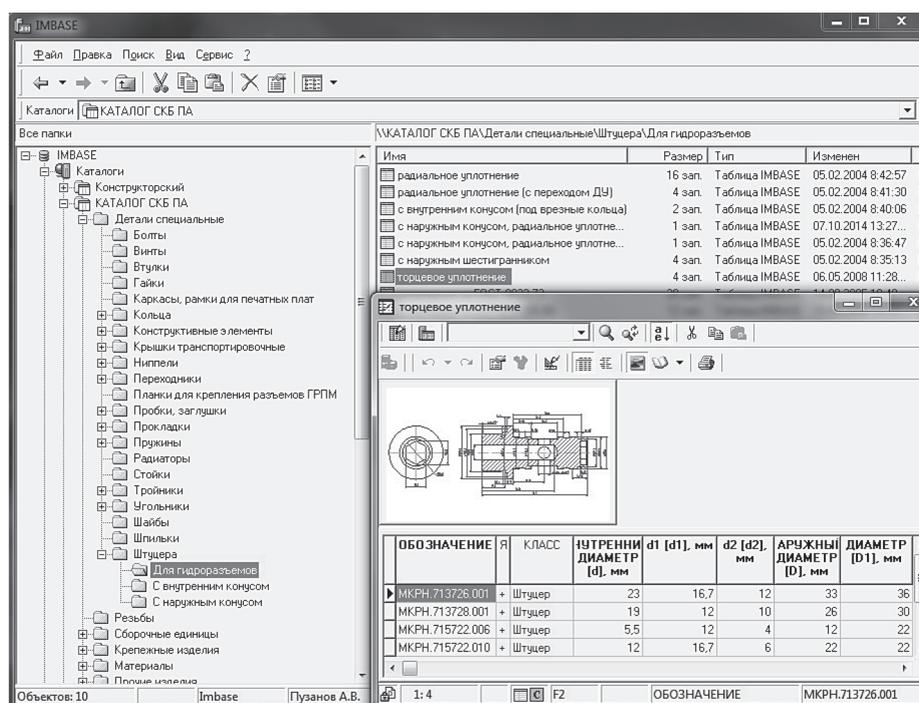


Рис. 5. Каталог КТЭ, сгруппированных по функциональному принципу

Для расчета экономической эффективности от предложенных мероприятий на отдельном проекте сравним изменения в трудоемкости работ базового варианта и проектируемого (с учетом предложенных мероприятий).

Данные по трудоемкости получены из выполненного в ОАО «СКБ ПА» проекта «Регулируемый гидравлический привод».

Для оценки трудоемкости работ, выполненных автоматизированным способом, использовался программный инструмент «Расчет трудоемкости проектирования», входящий в программный комплекс Интермех.

Таким образом, качественная оценка эффективности предлагаемых мероприятий производится на основе анализа диаграммы бизнес-процессов производства (в формулировке IDEF0), а количественная оценка – посредством программных средств Интермех, встроенных в соответствующие АРМ: конструктора, технолога, нормировщика [1].

Заключение

Применяя принцип единых баз данных КТЭ, на этапе КТПП стало возможным формализовать и автоматизировать процесс согласования на технологичность до 70% (в зависимости от степени инновационности применяемых конструкторско-технологических приемов) [4]. Новаторские конструкторские решения, пройдя обособленную процедуру согласования на технологичность, в свою очередь становятся частью обновленной базы КТЭ. Таким образом, по результатам реализации постпроизводственного принципа проектирования, используя программные средства Интермех, фиксируется увеличение времени разработки КД на 5–15%. Процедура использования и обновления базы КТЭ регламентирована СТО, согласованном и принятом на всех кооперирующих предприятиях и организациях, входящих в сегмент производственного цикла отраслевого куста.

Литература

1. Пузанов, А. В. Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства в ОАО «СКБ ПА». / А. В. Пузанов, К. Е. Куванов, А. Н. Часовских // САПР и Графика – 2009. № 11. С. 25–28.
2. Ахремчик, О. Л. Методология автоматизированного проектирования технического обеспечения АСУТП: автореферат дис.... доктора технических наук: 05.13.12, 05.13.06 / Твер. гос. техн. ун-т. – Тверь, 2009. – 32 с.
3. Аверченков, А. В. Автоматизация технологической подготовки производства для малых инновационных предприятий в машиностроении: автореферат дис.... доктора технических наук: 05.13.06 / Аверченков Андрей Владимирович; [Место защиты: Сарат. гос. техн. ун-т им. Гагарина Ю. А.]. – Саратов, 2012. – 35 с.
4. Пузанов, А. В. Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства на примере внутриотраслевой кооперации предприятий-смежников ОАО «СКБ ПА» и ОАО «КЭМЗ» / А. В. Пузанов, Г. М. Наумов // САПР и Графика – 2015. № 5. С. 49–55.

Поступила 05.06.15.

После доработки 15.09.15

PUZANOV A. V.

PRINCIPLE OF POST-PRODUCTION DESIGN OF HYDRAULIC ACTUATORS

JSC «Special design bureau of instrument making and automatic equipment»

Abstract. Summary. In work the problem of design-technology preparation of production of hydraulic actuators is staticized. The structure and business processes of design and production are analysed. Methods and means of reorganization of project works for the purpose of cutting-down of time of preparation of production are offered. The directions of reorganization of process of design are formulated. The principle of carrying out procedures of design-technology preparation of production of hydraulic actuators with use of ready elements of a production cycle is considered. The scheme of their practical realization at machine-building enterprise is offered. The assessment of growth of efficiency of design-technology preparation of production is given in machine-building enterprise.

УДК 004.054

СУЛИМ П. Е., ЮДЕНКОВ В. С.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА РИЗОГРАФИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

Белорусский Государственный Технологический Университет

Задачей исследования является разработка модели ризографической печати на основе функций пакета IRT и автоматизированного выбора профиля ризографической печати. Работа ризографа для полутоновой печати включает два этапа – изготовление трафаретной формы (мастер-пленки) и печать. Мастер-пленка поставляется и устанавливается в ризограф в виде рулонов различной емкости в зависимости от формата печати и модели аппарата. Емкость рулона измеряется в квадратах – отрезках формного материала. Мастер-пленка для ризографа состоит из трех слоев: прочный, но пористый слой типа бумажного полотна непроклеенного и без наполнителей; адгезионный слой, скрепляющий бумажное полотно с верхним слоем; верхний, тонкий полимерный слой.

Введение

Полутоновое изображение – это матрица, элементы яркости которой представлены в виде числовых значений. Если элементы полутонового изображения принадлежат классу `unit8` или `unit16`, то они представлены целыми числами, соответственно, в интервалах $[0, 255]$ и $[0, 65535]$. По общему соглашению, пикселы изображений *double* должны лежать в интервале $[0, 1]$.

Процессы в пространственной области описываются уравнением:

$$g(x, y) = T[f(x, y)],$$

где $f(x, y)$ – входное изображение, $g(x, y)$ – обработанное изображение, а T – некоторый оператор (преобразование) над f , который определен в некоторой области точки (x, y) . Простейшая форма преобразования T получа-

ется, когда окрестность на рис. 1 имеет размер 1×1 (т. е. состоит из одного пиксела).

В этом случае значение g в точке (x, y) зависит только от значения f в этой точке, и T становится функцией преобразования яркости (также называемой функцией градиационного преобразования). Эти два термина эквивалентны применительно к монохромным (полутоновым) изображениям. Поскольку такие преобразования зависят только от значения яркости, но не от (x, y) , функцию преобразования яркости часто записывают в простой форме:

$$s = T(r),$$

где r обозначает яркость f , а s – яркость g в любой соответствующей точке (x, y) изображения [1].

Анализ отпечатанных изображений и мастер-пленки на ризографе

Проведен эксперимент и анализ отпечатанных изображений с использованием цифрового полиграфического микроскопа PLATEVIEWER с программным обеспечением PLATECOUNTR для исследования структуры раstra ризографа EZ371. В результате получен внешний вид растровых структур точек оттиска (рис. 2, $a - 4, a, 2, b - 4, b, 6, a$ и $6, b$), а также пикселов мастер-пленки, сформированных термоголовкой ризографа EZ371 (рис. 2, $b - 4, b, 2, z - 4, b, 6, b$ и $6, z$) [2].

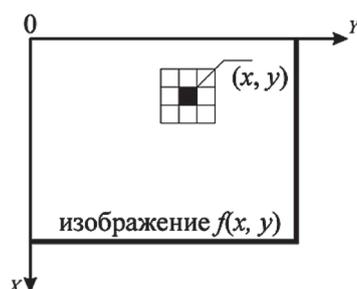


Рис. 1. Окрестность размера 3×3 вокруг точки (x, y) изображения

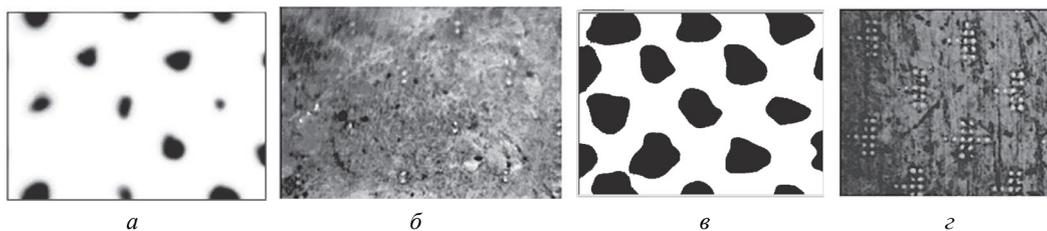


Рис. 2. Растровая структура эталона с 5% и 20% (а, в – вид раstra; б, г – вид прожженной мастер-пленки) заполнением черного цвета, распечатанного на ризографе EZ371E

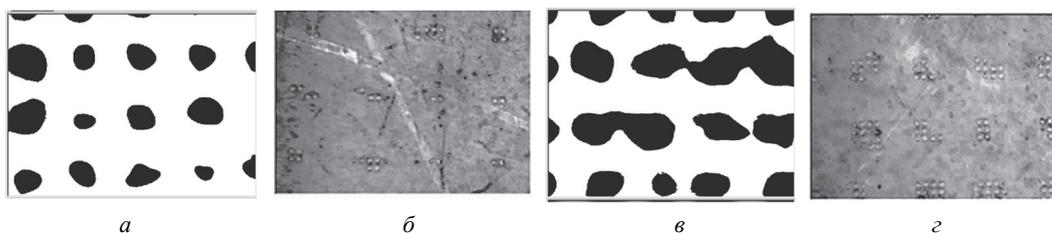


Рис. 3. Периодическая растровая структура с 5% и 20% (а, в – вид раstra; б, г – вид прожженной мастер-пленки) заполнением черного цвета, распечатанного на ризографе EZ371E

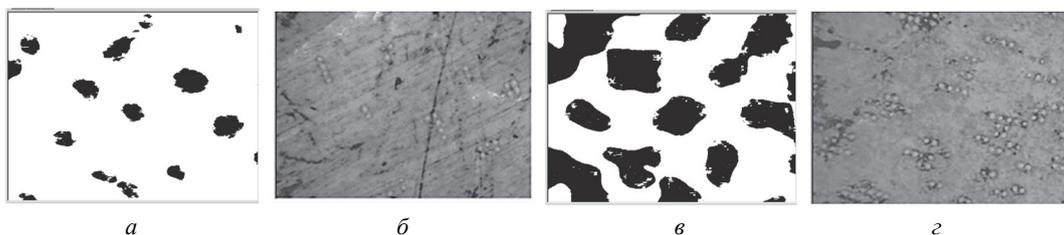


Рис. 4. Непериодическая растровая структура с 5% и 20% (а, в – вид раstra; б, г – вид прожженной мастер-пленки) заполнением черного цвета, распечатанного на ризографе EZ371E

На рис. 2, а, б представлена 5% растровая структура со следующими параметрами: увеличение $\times 200$, угол раstra – 45, линиатура раstra 82 лин/дюйм, форма растровой точки – искажена. На рис. 2, в, г представлена 20% растровая структура со следующими параметрами: увеличение $\times 200$, угол раstra – 45, линиатура раstra 80 лин/дюйм, форма растровой точки – искажена.

Вывод: как видно из рис. 2, а, в происходит искажение формы растровых точек при сохранении их места расположения. 5% периодический растр формируется двумя пикселями на растровую точку, а 20% периодический растр в среднем формируется 12 пикселями на растровую точку.

На рис. 3 представлена растровая структура 5% и 20% периодического раstra, полученная из Matlab на основе функции Rastr и распечатанная на ризографе EZ371. Параметры 5% периодического раstra: увеличение $\times 200$, угол раstra – 90, линиатура раstra 86 лин/дюйм, форма растровой точки – искажена. Параметры 20% периодического раstra: увели-

чение $\times 200$, линиатура раstra 91 лин/дюйм форма растровой точки – искажена, угол раstra – 90.

Вывод: как видно из рис. 3, а, в происходит слияние точек, что является дефектом на печати. На рис. 3, б имеются растровые точки с 2 и 8 пикселями, а среднее значение для 5% раstra 4 пиксела. На рис. 3, г имеются растровые точки с 5 и 9 пикселями, а среднее значение для 20% раstra 7 пикселей.

На рис. 4 представлена растровая структура 5% и 20% неперидического раstra, полученная из Matlab на основе функции Rastr и распечатанная на ризографе EZ371. На рис. 4, б имеются растровые точки с 2 и 6 пикселями, со средним значением для 5% неперидического раstra 4 пиксела. Расположение растровых точек происходит по случайному закону. На рис. 4, г имеются растровые точки с 2 и 15 пикселями, а среднее значение для 20% неперидического раstra 10 пикселей. Просматривается периодическая структура с углом 45 градусов, а заполнение растровых точек формируется по случайному закону.



Рис. 5. График спектра неперидической растровой структура с 5% и 20% заполнением черного цвета, распечатанного на ризографе EZ371E

Как видно из проведенных выше экспериментальных исследований на печатных оттисках имеются дефекты, заключающиеся в слиянии точек, неодинаковом количестве пикселей на растровую точку, поэтому для повышения качества оттисков ризографической печати и устранения выше приведенных дефектов необходимо подготовка изображений при помощи специальных программных средств. В качестве программного средства используется программная среда Matlab с использованием функции библиотеки IPT. Для изучения неперидической растровой структуры с 5-тью% заполнением черного цвета (напечатанного на ризографе) на рис. 5 показан спектральный анализ на примере гистограммы.

Проанализировав рис. 5, а, мы видим всплески на уровне 3 и 254 частотного диапазона. Эта характерная особенность спектрального графика соответствует изображению типа «graphic» и «outline drawing». По выявленному типу изображения на основе спектрального анализа будем применять фильтры и соответствующий тип растривания. Дефекты изображения могут быть обусловлены качеством мастер-пленки и ее прилегания к барабану. На рис. 5, б представлен спектральный анализ неперидической растровой структуры с 20% заполнением черным цветом. Проанализировав рис. 5, б, обнаружены всплески на уровне 2,3,207 и 254. Эта характерная особенность спектрального графика соответствует изображению типа «graphic» и «outline drawing» боле жирного начертания.

Гистограммой цифрового изображения, число возможных уровней яркости которого равна L , лежащих в диапазоне $[0, G]$, называется дискретная функция:

$$h(r_k) = n_k,$$

где r_k – это k -ый уровень яркости из интервала $[0, G]$, а n_k – число пикселей изображения, уровень яркости которых равен r_k .

Значение G равно 255 для изображений класса uint8, 65535 – для класса uint16 и 1.0 – для класса double. Напомним, что индексы в MATLAB начинаются с 1, а не с 0, поэтому r_1 соответствует уровню яркости 0, r_2 соответствует уровню яркости 1 и так далее до r_L , что соответствует уровню G . Заметим, что $G = L - 1$ для изображений класса uint8 и uint16. Часто бывает удобно работать с нормированными гистограммами, которые получаются делением элементов $h(r_k)$ на общее число пикселей изображения, которое мы обозначим n :

$$p(r_k) = \frac{h(r_k)}{n} = \frac{n_k}{n}$$

при $k = 1, 2, \dots, L$. С точки зрения теории вероятностей, число $p(r_k)$ – это вероятность (частота) появления (присутствия) уровня интенсивности r_k в данном изображении.

Стержневой функцией для обращения с гистограммами служит функция `imhist` со следующим синтаксисом:

$$h = \text{imhist}(f, b),$$

где f – это входное изображение, h – его гистограмма, $h(r_k)$, и b – число корзин, использованных при формировании гистограммы (если аргумент b отсутствует, то по умолчанию принимается $b = 256$). Корзиной называется подразделение шкалы яркости. Например, если при работе с изображениями класса uint8 переменная $b = 2$, то шкала яркости делится на две подобласти (корзины): от 0 до 127 и от 128 до 255. Итоговая гистограмма будет иметь два значения: $h(1)$, равное числу пикселей изображения, величины которых находятся в интервале $[0, 127]$, и $h(2)$, которое равно числу пикселей со значениями в интервале $[128, 255]$.

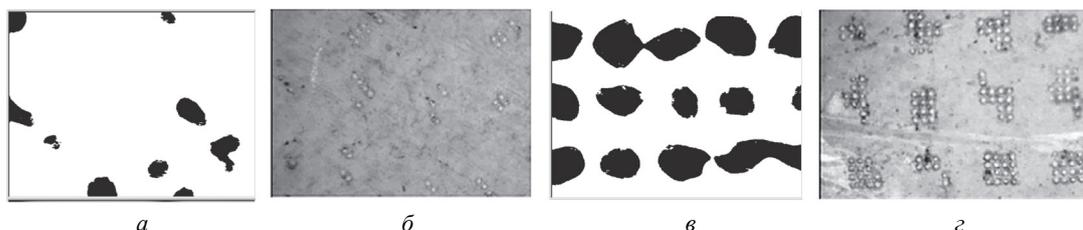


Рис. 6. Гибридная растровая структура с 5% и 20% (а, в – вид растра; б, г – вид прожженной мастер-пленки) заполнением черного цвета, распечатанного на ризографе EZ371E

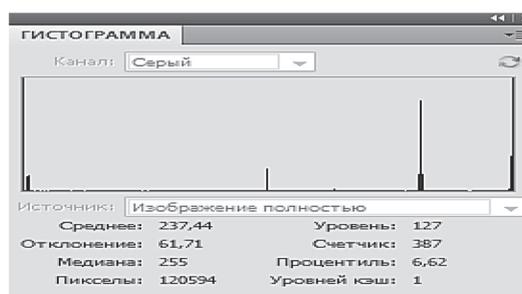


Рис. 7. График спектра гибридной растровой структура 5% заполнения черного цвета, распечатанного на ризографе EZ371E

Чтобы получить нормированную гистограмму, надо выполнить действие

$$p = imhist(f,b)/numel(f),$$

где $numel(f)$ дает число элементов массива f , т. е. число пикселей изображения [1].

На рис. 6 представлена растровая структура 5% и 20% гибридного растра, полученная из Matlab на основе функции `gastr` и распечатанная на ризографе EZ371. Гибридное растривание объединяет периодическое и непериодическое растривание, которые применяются в зависимости от сюжета содержания оригинала [3]. Непериодический растр при гибридном растривании применяется для воспроизведения светов и теней (рис. 6, а), а периодический растр – для воспроизведения полутонов (рис. 6, в).

На рис. 7 представлен график спектральной функции гибридной растровой структуры с 5% заполнением черного цвета (напечатанного на ризографе).

В спектральном составе обнаружены всплески на уровне 3,127,207 и 254. Эта характерная особенность спектрального графика соответствует изображению типа «graphic» и «outline drawing». Применение гибридного растривания для фото состоит в отсечении текста, и на основе метода спектральной плотности распознается тип изображения «photo». Применяем для него гибридное растривание [4, 5]. Как видно из рисунка 11б имеются растровые

точки с 2 и 6 пикселями, а среднее значение для 5% растра 5 пикселей. Параметры 20% растра следующие: увеличение – $\times 200$, угол растра – 90° , линиатура растра 93 лин/дюйм, форма растровой точки – искажена. Как видно из рис. 6, г имеются растровые точки с 2 и 16 пикселями, а среднее значение для 20% растра 13 пикселей. Просматривается периодическая структура с углом 90° градусов. Заполнение растровой точки имеет форму квадрата.

Заключение

На основании выше изложенного разработано программное обеспечение для управления ризографической печатью. Предлагается программный продукт для ризографической печати, который повышает четкость, резкость и насыщенность печати, снизив при этом издержки пробной подгонки нужного результата, и как показывает практика, применение определенных способов растривания для конкретного оригинала приводит к повышению производительности печати. Способ компьютерного управления ризографической печатью обеспечивает повышение качества печати отрисовок для ризографов полутоновой печати путем адаптации профиля печати изображения, обработанного фильтрами и функциями библиотеки IPT Matlab, к конкретному типу растривания, включенного в систему управления ризографом [6–8].

Литература

1. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
2. Чуркин А. В. Ризография / А. В. Чуркин, А. Б. Шашлов, А. В. Стерликова. – М.: МГУП, 2002. – 140 с.
3. Киппхан Г. Энциклопедия по печатным средствам информации. Технологии и способы производства / Г. Киппхан; Пер. с нем. – М.: МГУП, 2003. – 1280 с.
4. Сулим П. Е., Юденков В. С. Технология повышения качества ризографической печати на основе модельного управления // Труды БГТУ. – 2014. – № 9: Издательское дело и полиграфия / БГТУ. – Минск, 2014. – С. 123–126.
5. Сулим П. Е., Юденков В. С. Методика выбора профиля ризографической печати на основе модельного управления // Научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Друкарство молодежи» Киев, 2013. – С. 69–70
6. Sulim P., Yudenkov V. Hardware and software of the risograph printing intelligent module on the basis of model operation // Proceeding of the 5th International Scientific Conference «Printing Future Days 2013» / Chemnitz, Germany, 2013. – P. 355–366.
7. Сулим П. Е., Юденков В. С. Интеллектуальный модуль для ризографического оборудования // Будущее машиностроения России: Сб. тр. Седьмой Всерос. конф. молодых ученых и специалистов Москва, 24–27 сент. 2014 г. / Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014 С. 451–453.
8. Сулим П. Е., Юденков В. С. Автоматизация процесса обработки изображения на ризографе на основе специализированных алгоритмов и фильтров // Автоматизация и роботизация процессов и производств: материалы республиканского научно-практического семинара/ Минск: Бизнесофсет, 2014. – С. 79–82.

Поступила 25.06.15.

После доработки 7.09.15

Sulim P. E., Yudenkov V. S

SOFTWARE FOR SPECTRAL ANALYSIS RIZOGRAF PRINT

The objective of this study is to develop a model rizograficheskoy based printing functions package IPT and automated profile selection rizograficheskoy printing. Work risograph for halftone printing consists of two stages – production of screen form (master film) and printing. The master film is supplied and installed in the printing machine in the form of rolls of different sizes, depending on the print size and model of the device. The capacity of the roll is measured in squares – segments of the printing material. Master-film for risograph consists of three layers: a solid but porous layer such as a paper web neprokleennogo and without fillers; an adhesive layer bonding the paper web to the upper layer; upper, thin polymer layer.

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

INFORMATION SECURITY

УДК 004.9

СИДОРЕНКО А. В., ЖУКОВЕЦ Д. А., БГУ

ЭЛЕМЕНТЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО И ЛИНЕЙНОГО КРИПТОАНАЛИЗА АЛГОРИТМА ШИФРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО ХАОСА

Белорусский государственный университет

В данной работе проведена оценка устойчивости разработанного алгоритма шифрования на основе динамического хаоса, а так же рассмотрены основные принципы реализации линейного и дифференциального криптоанализа

In this paper we assessed the sustainability of the encryption algorithm based on dynamic chaos, as well as the basic principles for the implementation of linear and differential cryptanalysis

Современная криптография должна обеспечивать защиту, в том числе, критически важной, информации не только от структур других государств, но и транснациональных корпораций. В настоящее время в созданном нами информационном обществе она становится практически центральным инструментом для обеспечения достоверности, конфиденциальности и целостности передаваемой информации.

Объем циркулирующей в обществе информации стабильно возрастает. Популярность всемирной сети Интернет в последние годы способствует ежегодному удвоению информации. Фактически, на начало 21 века человечеством создана информационная цивилизация, в которой от успешной работы средств обработки информации зависит его благополучие и даже, в некотором смысле, его выживание.

Произошедшие за этот период изменения можно охарактеризовать следующим образом:

- объемы обрабатываемой информации возросли за полвека практически на несколько порядков;

- доступ к определенным данным позволяет контролировать значительные материальные и финансовые ценности; информация приобрела стоимость, которую можно рассчитывать;

- характер обрабатываемых данных стал чрезвычайно многообразным и значительно отличается от текстового представления;

- характер информационных взаимодействий усложнился, возникли новые задачи в сфере защиты информации;

- субъектами информационных процессов являются люди, а также созданные ими автоматизированные системы, действующие по заложенной в них программе;

- вычислительные мощности современных компьютеров подняли на совершенно новый уровень как возможности по реализации шифров, ранее немислимых из-за своей высокой сложности, так и возможности аналитиков по их взлому.

В современном мире информационный ресурс стал одним из наиболее мощных рычагов экономического развития. Владение информацией необходимого качества в нужное время и в нужном месте является залогом успеха в любом виде деятельности. Монопольное обладание определенной информацией оказывается зачастую решающим преимуществом в конкурентной борьбе и предопределяет, тем самым, высокую цену «информационного фактора».

Для защищаемой информации характерны следующие признаки:

- имеется какой-то определенный круг законных пользователей, которые имеют право владеть этой информацией;

- имеются незаконные пользователи, которые стремятся овладеть этой информацией с тем, чтобы обратить ее себе во благо, а законным пользователям во вред.

Решение задач защиты информации становится определяющим в современном обществе

В данной работе проведены исследования разработанного нами алгоритма шифрования, описание которого приведено в работе [1]

Устойчивость к линейным атакам (лавинный эффект)

В качестве исследуемого изображения выбран полученный со спутника снимок факультета радиофизики и компьютерных технологий БГУ размером 512×512 пикселей (рис. 1)

Для проверки чувствительности к открытому тексту, мы зашифруем цветное изображение. Затем, изменяем один бит в исходном изображении. Модифицированное изображение зашифруем снова с помощью того же ключа. Показатель изменения бит для пары зашифрованных изображений получают следующим образом [2] [3]:

$$\text{Кол-во бит изменившихся значение} = \frac{\text{Показатель изменения бит}}{\text{Общее количество бит}}$$

Из результатов тестирования разработанного алгоритма, при изменении одного бита в исходном изображении меняется 49.997843% бит в зашифрованном изображении, что очень близко к идеальному значению в 50%. Таким образом, алгоритм является устойчивым к линейным атакам.

Устойчивость к дифференциальным атакам

Основываясь на принципах криптологии, хороший алгоритм шифрования должен быть чувствительным к открытому тексту. Чувствительность алгоритма шифрования может быть



Рис. 1. Снимок факультета радиофизики и компьютерных технологий БГУ, с прилегающей к нему территорией

количественно оценена следующими параметрами: процент пикселей изменивших значение (Number of Pixels Change Rate (NPCR)) и среднее изменение интенсивности (Unified Average Changing Intensity (UACI)). Соответственно, NPCR и UACI определяются по следующим формулам:

$$NPCR = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N D(i, j) \cdot 100\%$$

$$UACI = \frac{1}{255MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |C_1(i, j) - C_2(i, j)| \cdot 100\%$$

$$\text{где, } D(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{если } C_1(i, j) = C_2(i, j) \\ 1, & \text{если } C_1(i, j) \neq C_2(i, j) \end{cases} \quad C_1(i, j)$$

и $C_2(i, j)$ значения пикселей двух зашифрованных изображений в положении (i, j) M и N представляют собой номера строки и столбца изображения.

Таблица 1. Результаты расчета параметров NPCR и UACI для двух зашифрованных цветных изображений факультета при условии, что исходные изображения отличались одним пикселем (R – красный цвет, G – зеленый цвет, B – синий цвет)

Изменение в пикселе	NPCR				UACI			
	R	G	B	Идеал	R	G	B	Идеал
(1,1)	99,6	99,61	99,62	99,61	33,39	33,46	33,41	33,46
(512,1)	99,59	99,6	99,61		33,46	33,43	33,46	
(1,512)	99,63	99,63	99,6		33,47	33,39	33,46	
(512,512)	99,61	99,62	99,62		33,52	33,45	33,5	
(256,256)	99,59	99,6	99,61		33,52	33,47	33,52	

В дополнение, идеальные значения $NPCR$ и $UACI$ могут быть рассчитаны по следующим формулам [4]:

$$NPCR_{ideal} = (1 - 2^{-n}) \cdot 100\%$$

$$UACI_{ideal} = \frac{1}{2^{2n}} \frac{\sum_{i=1}^{2^n-1} i(i+1)}{2^n - 1} \cdot 100\% = \\ = \frac{1}{3} (1 + 2^{-n}) \cdot 100\%$$

где n – количество битов используемых для представления одного пикселя. В сером изображении используется 8 бит на пиксель, $n = 8$.

Из результатов, приведенных в табл. 1, можно заметить, что получаемые значения $NPCR$ и $UACI$ колеблются около идеальных значений. Из этого следует, что алгоритм является чувствительным к малым изменениям в исходном изображении и устойчивым к дифференциальным атакам.

Элементы

дифференциального криптоанализа

Основной объект, который исследуется в дифференциальном криптоанализе – это пары блоков текста A и B с определенной разностью $A \oplus B$ [5]. Если информация о том, как связаны входная разность (между блоками открытого текста) и выходная разность (между блоками шифртекста), отсутствует, то все выходные разности равновероятны. Однако если удастся установить, что некоторая входная разность Δ_{in} приводит к некоторой выходной разности Δ_{out} с вероятностью p большей, чем остальные, то это может быть использовано для отыскания подключей шифра. Пара $(\Delta_{in}, \Delta_{out})$ называется *дифференциалом*, а совокупность дифференциалов на различных раундах называется *характеристикой*. Если Δ_{out} содержит неизвестные биты, то дифференциал называется *усеченным*.

Для совершенного шифра со 128-битовым блоком при любой входной разности выходная разность примет некоторое фиксированное значение с вероятностью 2^{-128} . Таким образом, если в процессе анализа шифра обнаружится, что определенная входная разность приводит к определенной выходной разности с вероятностью больше чем 2^{-128} (например, 2^{-100}), то эта информация может быть использована с целью отыскания его подключей. Количество тек-

стов, требуемых для реализации атаки, пропорционально $1/p$. В результате проведенной работы нами было получено распределение вероятностей для всех входных разностей функции шифрования F (см. табл. 2).

Таблица 2. Распределения вероятностей дифференциальных характеристик для входных разностей F -блока

№ п/п	Вероятность, p	Кол-во разностей
1	1	1
2	0,011–0,012	1
3	0,005–0,011	0
4	0,004–0,005	99
5	0,003–0,004	155
6	0,002–0,003	28
7	0,001–0,002	228
8	0,0004–0,001	0
9	0,0003–0,0004	1
10	0,0002–0,0003	5013
11	0,0001–0,0002	7837964
12	0–0,0001	4287123806

Видно, что лишь малой части входных разностей на выходе будут соответствовать одинаковой разности.

Чтобы показать вероятность, с которой одна входная разность создает определенную разность на выходе, вводят такое понятие, как *характеристика раунда*.

Следует обратить внимание на то, что характеристика одна и та же для каждого раунда, так как любое отношение, которое включает разности, не зависит от ключей раунда. На рис. 2 представлены только три из существующих характеристик. В каждой характеристике мы разделили входные разности и разности выхода в левые и правые секции. Каждая разность состоит из 4 шестнадцатеричных цифр (2 байт).

Все характеристики определяются с помощью разработанной нами компьютерной программы. На рис. 2, а показано, что входная разность (xxxx, 0000) дает на выходе разность (xxxx, 0000) с вероятностью 1 (здесь xxxx – любая разность). Из рис. 2, б видно, что входная разность (xxxx, FF00) дает разность на выходе (xxxx, FF00) с вероятностью 0,0116882. Наконец, рисунок 2, в показывает, что входная разность (0000,0808) дает разность на выходе (24D1,0808) с вероятностью 2^{-12} .

После создания и хранения однораундовых характеристик криптоаналитик может комби-

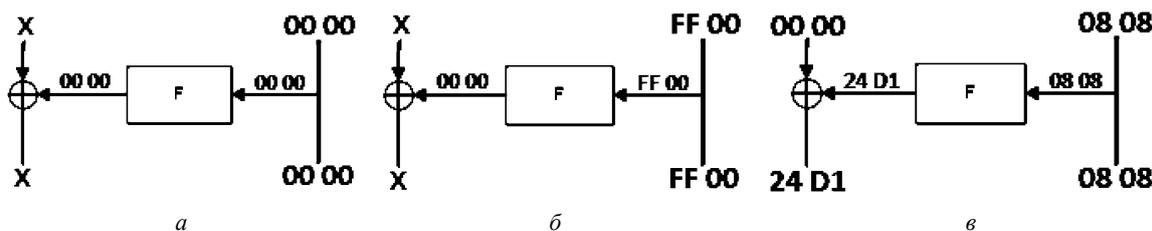


Рис. 2. Характеристики раунда для дифференциального криптоанализа при различных входных разностях: а – вероятность характеристики $p = 1$; б – вероятность характеристики $p = 0.0116882$; в – вероятность характеристики $p = 2^{-12}$

нировать разное количество раундов, чтобы создать множественную характеристику раунда. На рис. 3 приведена характеристика трехраундового алгоритма. Характеристики, показанные в первом и третьем раундах, аналогичны рис. 2, б. Характеристика во втором раунде – аналогична рис. 2, а.

Вероятность такой характеристики равна произведению вероятностей однораундовых характеристик $p = 0,0116882 \cdot 1 \cdot 0,0116882 = 0,0001366$.

Однако данный метод не учитывает малую часть возможных ситуаций, когда на вход поступает разность (0000, FF00), на выходе получается разность (0000, FF00), но на втором раунде используется характеристика с вероятностью $p \neq 1$. Для точного расчета вероятности многораундовой характеристики нами было реализовано программное обеспечение.

Результаты расчетов с использованием разработанной компьютерной программы приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчета вероятности многораундовой характеристики, для различного количества раундов

Кол-во раундов	Входная разность	Выходная разность	Вероятность, p
1	00 00 FF 00	00 00 FF 00	1,16882E-02
2	00 00 FF 00	FF 00 00 00	1,16882E-02
3	00 00 FF 00	00 00 FF 00	1,36787E-04
4	00 00 FF 00	FF 00 00 00	1,36787E-04
5	00 00 FF 00	00 00 FF 00	1,64052E-06
6	00 00 FF 00	FF 00 00 00	1,64052E-06
7	00 00 FF 00	00 00 FF 00	2,28174E-08
8	00 00 FF 00	FF 00 00 00	2,28174E-08
9	00 00 FF 00	00 00 FF 00	9,31323E-10
10	00 00 FF 00	FF 00 00 00	9,31323E-10
11	00 00 FF 00	00 00 FF 00	4,65661E-10
12	00 00 FF 00	FF 00 00 00	4,65661E-10
13	00 00 FF 00	00 00 FF 00	9,31323E-10
14	00 00 FF 00	FF 00 00 00	9,31323E-10
15	00 00 FF 00	00 00 FF 00	4,65661E-10

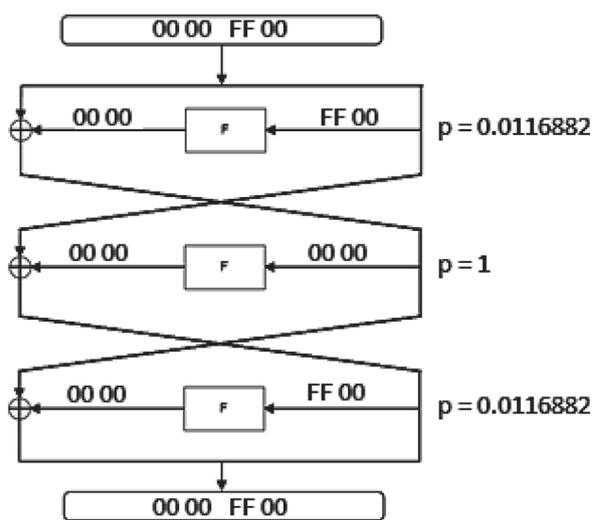


Рис. 3. Трехраундовая характеристика для дифференциального криптоанализа

Для нахождения ключа шифрования при использовании одного раунда применяем следующий алгоритм (обозначения представлены на рис. 4):

1) Строим уравнения функции шифрования

$$(f_1(X_1 \oplus K_1; X_2 \boxplus K_3) \boxplus K_2) \oplus (f_1(X_1^* \oplus K_1; X_2^* \boxplus K_3) \boxplus K_2) = \Delta Y_1,$$

$$f_2(X_2 \boxplus K_3; f_1(X_1 \oplus K_1; X_2 \boxplus K_3)) \oplus f_2(X_2^* \boxplus K_3; f_1(X_1^* \oplus K_1; X_2^* \boxplus K_3)) = \Delta Y_2,$$

где $X_1^* = X_1 \oplus \Delta X_1$; $X_2^* = X_2 \oplus \Delta X_2$; Δ – разность.

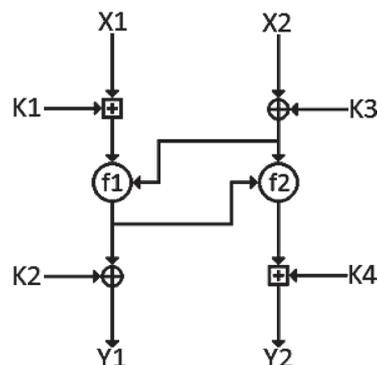


Рис. 4. Внутренняя структура раундовой функции F

2) Перебирая различные пары входных текстов с заданной разностью и различные ключи (K_1, K_2, K_3, K_4), будем подбирать несколько вариантов для ключа. Для всех вариантов ключа можно завести счетчики, и если какая-либо пара предлагает данный вариант в качестве верного ключа, будем увеличивать соответствующий счетчик. Ключ, которому соответствует самый большой счетчик, с высокой вероятностью является верным.

Чтобы выделить правильный ключ, необходима характеристика с соответствующей вероятностью и достаточное количество пар, чтобы гарантировать наличие правильных пар. Число необходимых пар определяется вероятностью характеристики, числом бит ключа, которые мы хотим определить и уровнем идентификации ошибочных пар (они не вносят вклада в счетчики, так как отбрасываются ранее). Пусть мы ищем k бит ключа, тогда у нас имеется 2^k счетчиков. Среднее значение счетчика равно $m\alpha\beta/2^k$, где m – число используемых пар, α – средняя добавка к счетчикам для одной пары, β – отношение пар которые вносят вклад в счетчики ко всем парам (в том числе отброшенным). Тогда отношение сигнал/шум определяется

$$S/N = \frac{mp}{m\alpha\beta/2^k} = \frac{2^k p}{\alpha\beta}$$

где p – вероятность характеристики, mp – число правильных пар.

Заметим, что отношение сигнал/шум для расчетной схемы не зависит от общего числа пар. Число необходимых правильных пар – в общем, является функцией отношения сигнал/шум. Экспериментально было получено, что если $S/N = 1 - 2$, необходимо 20–40 вхождений правильных пар. Если же отношение намного выше, то даже 3–4 правильные пары может быть достаточно. Наконец, когда оно значительно ниже, необходимо огромное число пар.

В результате проведенных расчетов с использованием разработанной нами компьютерной программы для одного раунда F функции с входным значением $X = \{00,04\}$ и выходным $Y = \{01,05\}$ были получены следующие значения:

$$\beta = 2^0; \alpha = 3 \times 2^8; k = 24; p = 2^{-15}; S/N = 2/3;$$

Следовательно, необходимо вхождение порядка 60 правильных пар для проведения крип-

тоанализа данного раунда. Всего понадобится $60/2^{-15} \approx 2^{21}$ текстов для криптоанализа раунда.

Для раунда F функции с входным значением $X = \{FF,00\}$ и выходным $Y = \{00,00\}$ были получены следующие значения:

$$\beta = 2^0; \alpha = 3 \times 2^{16}; k = 24; p = 0,01169; S/N = 1;$$

Следовательно, для проведения криптоанализа необходимо порядка 40 вхождений правильных пар. Всего понадобится $40/0,01169 \approx 3425$ текстов для криптоанализа раунда.

В качестве примеров были выбраны варианты с минимальной и максимальной вероятностью. Как видно из приведенных результатов количество текстов необходимых для криптоанализа одного раунда алгоритма в обоих случаях довольно высоко

Элементы линейного криптоанализа

Линейный криптоанализ заключается в поиске линейной аппроксимации между открытым текстом, соответствующим зашифрованным текстом и ключом шифрования. Оказывается, можно представить функцию шифрования в виде системы уравнений, которые выполняются с некоторой вероятностью p . Так как уравнения, полученные в ходе анализа криптоалгоритма, являются вероятностными, то их называют линейными статистическими аналогами. Эффективность линейного статистического аналога определяется отклонением, которое вычисляется как $\Delta = |1 - 2p|$. При этом для успешного анализа вероятность уравнений p должна быть, как можно дальше удалена от значения $1/2$ (то есть приближаться либо к нулю, либо к единице). Полученные значения в дальнейшем используются для нахождения искомого значения ключа шифрования.

Линейная аппроксимация функции шифрования в общем виде выглядит следующим образом [6]:

$$P_{i1} \oplus \dots \oplus P_{il} \oplus C_{j1} \oplus \dots \oplus C_{jm} = K_{k1} \oplus \dots \oplus K_{kn}$$

где P_n, C_n, K_n – n -ые биты открытого текста, зашифрованного текста и ключа.

Вероятность p справедливости такого соотношения для произвольно выбранных бит открытого текста, зашифрованного текста и ключа примерно равна $1/2$.

Пусть на вход функции F i -го раунда шифрования поступает значение X , на выходе

функции F i -го раунда шифрования образуется значение Y . Используемый бит для значений X и Y будем заключать в квадратные скобки.

Для построения линейной аппроксимации одного раунда шифрования были использованы вычислительные мощности суперкомпьютера СКИФ-БГУ. Так же, для уменьшения времени расчёта линейных аппроксимаций была упрощена структурная схема раундовой функции F (см. рис. 5)

Результаты, полученные с использованием разработанной нами компьютерной программы, позволили определить следующие аппроксимации:

$$\begin{aligned} X1[0,3,4,5,6,7] \oplus K1[0,3,4,5,6,7] \oplus X2[1,3,5] \oplus \\ \oplus K3[1,3,5] \oplus Y1[0,1] \oplus Y1[2,3,4,5] \oplus \\ \oplus K2[0,1,2,3,4,5] \oplus Y2[1,2,3,4,5,6] \oplus \\ \oplus K4[1,2,3,4,5,6] = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X1[1,2,3,4,6] \oplus K1[1,2,3,4,6] \oplus X2[4,5] \oplus \\ \oplus K3[4,5] \oplus Y1[1] \oplus Y1[4,5,7] \oplus K2[1,4,5,7] \oplus \\ \oplus Y2[0,1,2,5,6] \oplus K4[0,1,2,5,6] = 1 \end{aligned}$$

Вероятность выполнения полученных линейных аппроксимаций, а так же получаемые при этом отклонения соответственно равны:

$$\begin{aligned} p = 0,489380, \Delta = 0,02124 \\ \text{и } p = 0,510376, \Delta = 0,020752. \end{aligned}$$

Количество текстов необходимых для криптоанализа одного раунда

$$\left| 0,5104 - \frac{1}{2} \right|^{-2} = 1,13 \cdot 2^{13}.$$

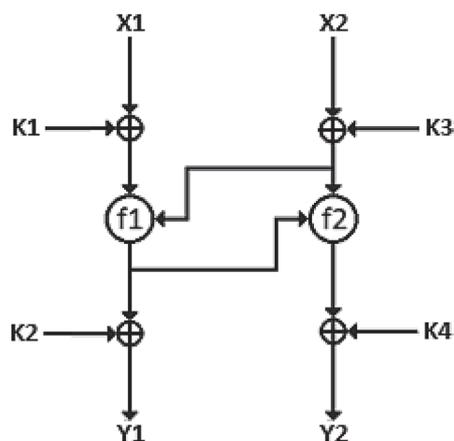


Рис. 5. Внутренняя структура упрощенной раундовой функции F

Заключение

В результате выполнения работы нами проведен анализ устойчивости алгоритма шифрования данных на основе динамического хаоса. При этом проведены исследования по реализации элементов дифференциального и линейного крипто-анализа при одном раунде шифрования. Разработано и использовано программное обеспечение для проведения как для дифференциального, так и линейного криптоанализа.

Результаты анализа данных, полученных в результате тестирования, показали, что алгоритм шифрования является устойчивым к вскрытию разработанного шифра, что было подтверждено использованием элементов дифференциального и линейного криптоанализа.

Литература

1. Сидоренко А. В. Блочный алгоритм шифрования на основе динамического хаоса / Сидоренко А. В., Жуковец Д. А. // *Вестник БГУ*. – 2015.
2. Seyedzadeh S. M. Image Encryption Algorithm Based on Choquet Fuzzy Integral with Self-Adaptive Pseudo-Random Number Generator / Seyedzadeh S. M., Hashemi Y. // *11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), Cordoba, 22–24 Nov. 2011* – Cordoba, 2011. – P. 642–647.
3. Seyedzadeh S. M. RGB Color Image Encryption based on Choquet Fuzzy Integral / Seyedzadeh S. M., Norouzi B., Mirzakuchaki S. // *The Journal of Systems and Software*. – 2014 – Vol. 97 – P. 128–139.
4. A novel image encryption scheme based on an improper fractional-order chaotic system / Jianfeng Zhao [et al.] // *Non-linear Dynamics* – 2015.
5. Biham E. Differential Cryptanalysis of DES-like Cryptosystems / Biham E., Shamir A. // *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 537, pp. 2–21, 1991.
6. Matsui M. Linear Cryptanalysis Method for DES Cipher / Matsui M. // *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 765, pp. 386–397, 1994.

Поступила 28.08.15. После доработки 15.09.15

Sidorenko A., Zhukovets L. A.

**DIFFERENTIAL AND LINEAR CRYPTOANALYSIS METHODS ELEMENTS
FOR ENCRYPTION ALGORITHM BASED ON DYNAMIC CHAOS**

In this paper we assessed the sustainability of the encryption algorithm based on dynamic chaos, as well as the basic principles for the implementation of linear and differential cryptanalysis.

Правила для авторов

1. Общие требования

Материалы статей представляются на бумажном носителе (в двух экз.) по адресу: 220013, Минск, ул. Ф. Скорины, 25/3, корп. 20, каб. 508 (Петренко Юрий Николаевич) и в электронном виде e-mail: CA_PI@bntu.by. Телефон для справок: (017) 266 26 58.

Статья, представляемая на бумажном носителе, должна быть подписана всеми авторами. К статье прилагаются сведения об авторах: фамилия, имя, отчество полностью, домашний адрес, телефоны, адрес электронной почты, место работы, ученая степень и звание.

Статьи, поступившие в редакцию журнала, регистрируются в установленном порядке. Статьи, оформленные с нарушением приведенных правил, к рассмотрению редакцией не принимаются. Принятые статьи рецензируются. При положительной рецензии статья предлагается к опубликованию.

Редакция не принимает статьи, опубликованные ранее в других журналах или научных изданиях.

Гонорар автору за публикацию статьи не выплачивается. Материалы, присланные в редакцию, авторам не возвращаются.

2. Правила оформления статей

Объем статей (с иллюстрациями) не должен превышать:

- для оригинальной статьи – 7 страниц (не более 8 иллюстраций);
- для краткого сообщения – 3 страницы (не более 2 иллюстраций).

Статья должна быть набрана с помощью текстового редактора Microsoft Word 2007.

Параметры страницы: формат А4 (высота 29,7 см., ширина – 21 см.); отступ для левого поля и поля сверху – 25 мм, правого и нижнего – 20 мм; нумерация страниц сверху в колонтитуле, со второй страницы, с выравниванием по правому краю.

Текст набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт. Межстрочный интервал – полуторный. Абзацный отступ – 12 мм.

2. Индекс УДК набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, все прописные, выравнивание – по правому краю.

3. Фамилия и инициалы автора (авторов) в именительном падеже печатаются шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, курсив, выравнивание – по левому краю.

4. Название статьи набирается шрифтом Arial, 12 пт, жирный, все прописные, выравнивание – по центру.

5. Полное название организации (организаций), в которой работает автор (авторы) набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, выравнивается по центру. После названия организации пропускается две строки.

6. Аннотация на языке статьи набирается шрифтом TimesNewRoman, 10 пт, курсив, выравнивается по центру. Объем аннотации не более 8 строк, межстрочный интервал 1,15.

После аннотации пропускается одна строка.

7. Текст статьи (набирается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, с абзацем, выравнивание – по ширине) должен содержать следующие элементы:

1) введение (может содержать: краткий обзор литературы по проблеме исследования, перечисление нерешенных ранее вопросов, постановку проблемы, цель исследований). Слово «Введение» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

2) основная часть исследования (возможно деление на подразделы), включающая графики и другой иллюстративный материал (при их наличии), при этом таблицы и рисунки не должны дублировать друг друга. Название каждого подраздела статьи печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

3) Заключение (формулируются основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ по сравнению с аналогами). Слово «Заключение» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, жирный, выравнивание – по левому краю.

8. Литература. Список литературы оформляется шрифтом TimesNewRoman, 12 пт в соответствии с Инструкцией по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертации, утвержденной постановлением президиума Государственного высшего аттестационного комитета Республики Беларусь 24.12.1997 № 178 (в редакции постановления ВАК Беларуси от 22.02.2006 № 2). www.edu.grsu.by/files/liter.doc.

Слово «Литература» печатается шрифтом TimesNewRoman, 12 пт, все прописные, выравнивание – по левому краю.

Источники должны располагаться в порядке цитирования в тексте. Порядковые номера ссылок в тексте должны быть написаны внутри квадратных скобок (например: [1], [2]). В обзорных статьях указывается не более 15 источников, во всех других – не более 7–10.

9. К статье на русском (англ.) языке должна прилагаться аннотация на английском (русском) языке. Она должна содержать: Название статьи, фамилию и инициалы автора (авторов), краткое содержание статьи не более 8 строк.

10. Оформление формул. Только сложные формулы должны быть набраны с помощью встроенного в MS Word редактора формул Equation. Просто буквы с индексами могут быть набраны без использования формульного редактора с помощью средств оформления MS Word. Латинские символы должны быть набраны курсивом, как в формулах, так и на рисунках, и в тексте, а русские и греческие – обычным текстом.

В редакторе формул должен быть установлен следующий размер символов: обычный символ – 11 пт., крупный индекс – 7 пт., мелкий индекс – 5 пт., крупный символ – 17 пт., мелкий символ – 12 пт. Формулы выравниваются по центру страницы. При необходимости делать ссылки на формулы их следует нумеровать арабскими цифрами, помещенными в круглые скобки, в порядке упоминания. Номера формул выравниваются по правому краю страницы.