

ISSN online 2658-6436

№ 4 (6)
2019

Научно-технический журнал

Автоматизация и моделирование

в проектировании и управлении



АВТОМАТИЗАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

В проектировании и управлении

НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ



Издается с 2018 года

№ 4(06), 2019

Сетевое издание

Выходит 1 раз в квартал

Учредитель издания – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Брянский государственный технический университет» (БГТУ)

Председатель редакционного совета – Сигов А.С., д-р. физ. мат. наук, проф., академик РАН

Заместитель председателя редакционного совета – Аверченков А.В., д-р. тех. наук, доц.

Заместитель председателя редакционного совета – Федонин О.Н., д-р. тех. наук, проф.

Бобырь М.В., д-р. тех. наук, проф. (Курск)
Бочкарев П.Ю., д-р. тех. наук, проф. (Саратов)
Долгов Ю.А., д-р. тех. наук, проф. (Тирасполь)
Еременко В.Т., д-р. тех. наук, проф. (Орел)
Ивашук О.А., д-р. тех. наук, проф. (Белгород)
Карпенко А.П., д-р. физ. мат. наук, проф. (Москва)
Квятковская И.Ю., д-р. тех. наук, проф. (Астрахань)
Кравец А.Г., д-р. тех. наук, проф. (Волгоград)
Курейчик В.В., д-р. тех. наук, проф. (Таганрог)
Ланцов В.Н., д-р. тех. наук, проф. (Владимир)
Носков С.И., д-р. тех. наук, проф. (Иркутск)

Пестер А., д-р. тех. наук, проф. (Австрия)
Петрешин Д.И., д-р. тех. наук, проф. (Брянск)
Подвесовский А.Г., канд. тех. наук, доц. (Брянск)
Пылькин А.Н., д-р. тех. наук, проф. (Рязань)
Скрыпников А.В., д-р. тех. наук, проф. (Воронеж)
Соснин П.И., д-р. тех. наук, проф. (Ульяновск)
Феофанов А.Н., д-р. тех. наук, проф. (Москва)
Хейфец М.Л., д-р. тех. наук, проф. (Белорусь)
Чепчуrows М.С., д-р. тех. наук, проф. (Белгород)
Шептунов С.А., д-р. тех. наук, проф. (Москва)
Ярушкина Н.Г., д-р. тех. наук, проф. (Ульяновск)

Редколлегия

Главный редактор – Аверченков В.И. д-р. тех. наук, проф.

Зам. главного редактора – Захарова А.А. д-р. тех. наук, доц.

Зам. главного редактора – Подвесовский А.Г. канд. тех. наук, доц.

Ответственный секретарь – Кузьменко А.А. канд. биол. наук

Корректор – Андросов К.Ю.

Адрес редакции:

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7
тел.: (4832) 56-49-90

Адрес размещения: <https://aimpu.ru>

E-mail: aim-pu@mail.ru

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС77-73848 от 05 октября 2018 года

ISSN online: 2658-6436

Журнал включен в специализированный референтный библиографический сервис Crossref

Журнал публикует основные результаты научных исследований по специальностям:

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами
05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах

05.13.12 – Системы автоматизации проектирования
05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

AUTOMATION AND MODELING

SCIENTIFIC TECHNICAL
JOURNAL



in design and management

Issued since 2018

№ 4(06), 2019

Online edition

Published once a quarter

The founder of the publication—the Federal state budgetary educational
institution of higher education

«Bryansk State Technical University» (BSTU)

Chairman of Editorial Board – Sigov A.S., D. Phys.-Mat., Professor, Academician of RAS

Deputy Chairman of Editorial Board – Averchenkov A.V., D. Eng., Associate professor

Deputy Chairman of the editorial Board – Fedonin O.N., D. Eng., Professor

M.Yu. Bobyr, *D. Eng., Prof., (Kursk)*

P.Yu. Bochkaryov, *D. Eng., Prof., (Saratov)*

Yu.A. Dolgov, *D. Eng., Prof., (Tiraspol)*

V.T. Yermenko, *D. Eng., Prof., (Orel)*

O.A. Ivashchuk, *D. Eng., Prof., (Belgorod)*

A.P. Karpenko, *D. Phys.-Mat., Prof., (Moscow)*

I.Yu. Kvyatkovskaya, *D. Eng., Prof., (Astrakhan)*

A.G. Kravets, *D. Eng., Prof., (Volgograd)*

V.V. Kureichik, *D. Eng., Prof., (Taganrog)*

V.N. Lantsov, *D. Eng., Prof., (Vladimir)*

S.Yu. Noskov, *D. Eng., Prof., (Irkutsk)*

A. Pester, *D. Eng., Prof., (Austria)*

D.I. Petreshin, *D. Eng., Prof., (Bryansk)*

A.G. Podvesovskiy, *Can. Eng., Assoc. Prof. (Bryansk)*

A.N. Pylkin, *D. Eng., Prof., (Bryansk)*

A.V. Skrypnikov, *D. Eng., Prof., (Voronezh)*

P.I. Sosnin, *D. Eng., Prof., (Ulyanovsk)*

A.N. Feofanov, *D. Eng., Prof., (Moscow)*

M.L. Kheifets, *D. Eng., Prof., (Minsk, Belarus)*

M.S. Chepchurov, *D. Eng., Prof., (Belgorod)*

S.A. Sheptunov, *D. Eng., Prof., (Moscow)*

N.G. Yarushkina, *D. Eng., Prof., (Ulyanovsk)*

Editorial board

Editor-in-Chief – Averchenkov V.I. D. Eng., Prof.,

Deputy Editor-in Chief – Zaharova A.A. D. Eng., Assoc. Prof.

Deputy Editor-in Chief – Podvesovskiy A.G. Can. Eng., Assoc. Prof.

Executive Secretary – Kuzmenko A.A. Can. Biol. Sc.

Corrector – Maliukina A.Yu.

*Address of edition 7, 50 Years of October Avenue,
Bryansk, Russia, 241035*

Tel.: (4832) 56-49-90

Accommodation address: <https://aimpu.ru>

E-mail: aim-pu@mail.ru

The Journal is registered by the Federal
Service for Supervision in the Sphere of Telecom,
Information Technologies and Mass Communications
of Russian Federation (ROSKOMNADZOR). Registration
certificate Эл № ФЦ77-73848 of October 05, 2018

ISSN online: 2658-6436

Journal is included in a specialized consultant bibliographical service CrossRef

Reprinting, all kinds of material copying and reproduction of materials published in the journal “Automation and modeling in design and management” is allowed only with the Editorial Board’s permission and a reference to the source of information

© Bryansk State Technical University, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

- Лабути́н А.Н., Зага́ринская Ю.Н., Невини́цын В.Ю., Волко́ва Г.В. Синтез и анализ системы управления концентрацией в химическом реакторе на базе регулятора состояния 4
- Жи́галов М.В., Апры́скин В.А., Кры́сько В.А. Исследование синхронизации контактного взаимодействия нанобалок 12
- Бербе́рова М.А., Обо́ймов А.С., Фе́дорова А.Ю., Росщупки́на П.А., Бе́лая А.А. Риск-информированная система безопасности 17
- Бербе́рова М.А., Дми́триев А.В., Го́лубков А.В., Ели́заров А.И., Ми́рзоев Д.Х., Кривошлы́кова Е.С. Вероятностные модели отказов и восстановлений, используемые при выполнении вероятностного анализа безопасности 25

Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования

- Кры́сько В.А., Тебя́кин А.Д., Салты́кова О.А. Аналитическое решение уравнения теплопроводности для различных граничных условий 33
- Лю́бимов М.С., Лу́шков В.И., Аза́рченков А.А. Распознавание объектов дорожной инфраструктуры с помощью полносверточной нейронной сети 38
- Фео́фанов А.Н., Охма́т А.В., Бердю́гин А.В. VR/AR-технологии и их применение в машиностроении 44

CONTENTS

Mathematical modeling, numerical methods and program complexes

- Labutin A.N., Zagarinskaya Yu.N., Nevitsyn V.Yu., Volkova G.V. Synthesis and analysis of the concentration control system in the chemical reactor on the basis of the state controller 4
- Zhigalov M.V., Apryskin V.A., Krysko V.A. Investigation of nanobeam contact interaction synchronization 12
- Berberova M.A., Oboymov A.S., Fedorova A.Yu., Rosshchupkina P.A., Belaya A.A. Risk-informed security system 17
- Berberova M.A., Dmitriev A.V., Golubkov A.V., Elizarov A.I., Mirzoev D.Kh., Krivoshlykova E.S. Probabilistic models for failures and recoveries used for the probabilistic safety analysis execution 25

Automation and control of technological processes and production, automated design systems

- Krysko V.A., Tebyakin A.D., Saltykova O.A. Analytical solution of the equation of conductivity for various boundary conditions 33
- Lubimov M.S., Lushkov V.I., Azarchenkov A.A. Object recognition of road infrastructure using a fully convolutional neural network 38
- Feofanov A.N., Okhmat A. V., Berdyugin A.V. VR/AR technologies and their application in mechanical engineering 44

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

УДК: 66.011:681.51

DOI: 10.30987/2658-3488-2019-4-4-11

А.Н. Лабути́н, Ю.Н. Зага́ринская, В.Ю. Невини́цын, Г.В. Волкова

СИНТЕЗ И АНАЛИЗ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ НА БАЗЕ РЕГУЛЯТОРА СОСТОЯНИЯ

В работе решена задача синтеза одноканальной системы управления вектором концентраций в жидкофазном химическом реакторе с использованием регулятора состояния. Параметры настройки регулятора состояния определены с использованием метода модального управления. Для устранения статической ошибки регулирования и обеспечения свойства робастности системы управления в структуру регулятора состояния введена интегральная составляющая.

Ключевые слова: химический реактор, регулятор состояния, модальное управление, интегральная составляющая, нелинейный объект управления, компьютерное моделирование.

A.N. Labutin, Yu.N. Zagarsinskaya, V.Yu. Nevinitsyn, G.V. Volkova

SYNTHESIS AND ANALYSIS OF THE CONCENTRATION CONTROL SYSTEM IN THE CHEMICAL REACTOR ON THE BASIS OF THE STATE CONTROLLER

The paper deals with the synthesis of a single-channel control system of concentration vector in a liquid-phase chemical reactor using a state controller. Settings of the state controller are determined using the modal control method. An integral component was introduced into the structure of the state controller to eliminate the static control error and ensure the robustness of the control system.

Keywords: chemical reactor, state controller, modal control, integral part, nonlinear control object, computer simulation.

Введение

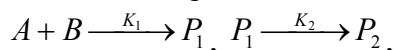
Цель функционирования химического реактора – это реализация процесса превращения исходных реагентов в продукты реакции и обеспечение заданного состава реакционной смеси. Показателем ресурсоэффективности является степень превращения какого-либо исходного реагента или выход целевого продукта. Отсюда главной задачей системы автоматизации и управления объектом является задача стабилизации концентрации целевого компонента на оптимальном уровне в условиях действия возмущений. Трудность и проблема решения задачи структурно-параметрического синтеза системы автоматического управления (САУ) обусловлена многомерностью, многосвязностью и нелинейностью математической модели реактора [1]. Несмотря на указанные свойства объекта до настоящего времени для управления процессом используются линейные САУ на базе ПИД-алгоритмов [2, 3]. Поскольку при синтезе линейных систем с использованием моделей «вход-выход» не учитывается многомерность и взаимное влияние координат состояния, в таких системах

усиливается влияние параметрических и сигнальных возмущений на качество процессов управления [4]. В настоящее время в условиях возрастания требований к качеству и эффективности управления технологическими процессами является целесообразным применение принципа управления по вектору состояния, основанного на использовании безынерционных регуляторов состояния (РС), либо комбинированных РС, включающих гибкие обратные связи по производным координат состояния или интегралам координат состояния [4-6]. При выбранной структуре системы управления с РС особое значение для обеспечения робастности системы приобретает метод параметрического синтеза системы. Наиболее часто используется для решения этой задачи метод модального управления [7, 8].

В предлагаемой работе решается задача синтеза одноканальной системы управления вектором концентраций в химическом реакторе с использованием регулятора состояния методом модального управления.

Характеристика объекта управления и постановка задачи

Объектом управления является жидкофазный химический реактор емкостного типа, в котором реализуется двухстадийная химическая реакция:



где A, B – исходные реагенты; P_1, P_2 – продукты реакции; K_1, K_2 – константы скоростей стадий.

Принципиальная схема реактора представлена на рис. 1. Исходные реагенты A и B подаются в аппарат отдельными потоками. Режим работы реактора – изотермический. Целевым продуктом является вещество P_1 ; P_2 – побочный продукт.

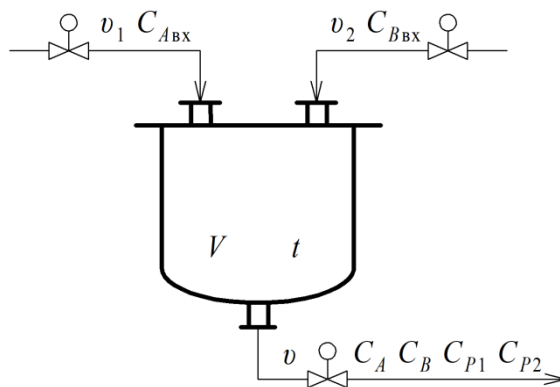


Рис. 1. Принципиальная схема реактора

На рис. 1 обозначено: v_1, v_2 – расходы потоков исходных компонентов; $C_{Aвх}, C_{Bвх}$ – концентрации исходных компонентов; v – расход смеси на выходе из реактора; t – температура смеси в реакторе; C_A, C_B, C_{P1}, C_{P2} – концентрации продуктов реакции; V – объем смеси в реакторе.

Математическая модель динамики объекта при допущении о постоянстве уровня имеет вид:

$$\begin{aligned} V \frac{dC_A}{d\tau} &= v_1 C_{Aвх} - (v_1 + v_2) C_A + V(-K_1 C_A C_B); \\ V \frac{dC_B}{d\tau} &= v_2 C_{Bвх} + V(-K_1 C_A C_B) - (v_1 + v_2) C_B; \\ V \frac{dC_{P1}}{d\tau} &= V(K_1 C_A C_B - K_2 C_{P1}) - (v_1 + v_2) C_{P1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Исходя из требований к содержанию побочного продукта в реакционной смеси (C_{P2}) при заданной нагрузке на аппарат по исходным реагентам $\{(v_1; C_{A_{ВХ}}), (v_2; C_{B_{ВХ}})\}$ были определены режимно-технологические и конструктивные параметры процесса в стационарном установившемся режиме функционирования объекта. Значения параметров представлены ниже: $V = 500$ л; $t = 68.45$ °C; $v_1 = 3$ л/мин; $v_2 = 3.5$ л/мин; $C_{A_{ВХ}} = 19.74$ моль/л; $C_{B_{ВХ}} = 5$ моль/л; $K_1 = 120000$ л/(моль мин); $K_2 = 12000$ л/(моль мин); $C_A = 7.21$ моль/л; $C_B = 0.787$ моль/л; $C_{P1} = 1.843$ моль/л.

Задача управления химическим реактором заключается в стабилизации концентрации целевого продукта на заданном значении $C_{P1} = \bar{C}_{P1}$ в условиях действия возмущений. В качестве управляющего воздействия выступает расход потока реагента $A - v_1$.

Поскольку предполагается синтез САУ на базе РС, проведено исследование устойчивости положения равновесия (свободного движения) объекта и управляемости в пространстве состояний. С этой целью осуществлена линеаризация математической модели объекта в окрестности положения равновесия.

В общем виде линеаризованная в окрестности положения равновесия математическая модель запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\bar{x}}{d\tau} &= A\bar{x} + Bu; \\ y &= F\bar{x}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\bar{x} = \Delta \bar{C} = (\Delta C_A \quad \Delta C_B \quad \Delta C_{P1})^T$ – вектор состояния; $u = \Delta v_1$ – управление; A, B – матрица состояний и управления; y – вектор выходных переменных; F – матрица измерений. Матрицы A, B и F имеют вид:

$$A = \begin{bmatrix} -0.016 & -0.031 & 0 \\ -0.0034 & -0.044 & 0 \\ 0.0034 & 0.031 & -0.013 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0.025 \\ -0.00157 \\ -0.0037 \end{bmatrix}; \quad F = [0 \quad 0 \quad 1].$$

Были определены собственные числа матрицы A (корни характеристического полинома) $\det(I \cdot s - A) = 0$:

$$s_1 = -0.013, s_2 = -0.047, s_3 = -0.0126.$$

Все собственные числа вещественные и отрицательные, следовательно, объект обладает свойством устойчивости положения равновесия. Для исследования свойства управляемости объекта в пространстве состояний построена и вычислена матрица управляемости:

$$M_u = [B; AB; A^2B] = \begin{bmatrix} 2.5 \cdot 10^{-2} & -3.513 \cdot 10^{-4} & 6.115 \cdot 10^{-6} \\ -1.6 \cdot 10^{-3} & -1.592 \cdot 10^{-5} & 1.895 \cdot 10^{-6} \\ -3.7 \cdot 10^{-3} & 8.443 \cdot 10^{-5} & -2.786 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix}.$$

Поскольку ранг матрицы управляемости равен 3, то объект полностью управляем в пространстве состояний [9]. Наличие свойств устойчивости свободного движения и полной управляемости объекта позволяет использовать метод модального управления для решения задачи параметрического синтеза РС. Регулятор состояния синтезируется с использованием линеаризованной модели объекта (2), а функционировать будет на реальном нелинейном объекте. Поэтому представляет интерес сравнение динамических характеристик нелинейного и линеаризованного объекта по каналу управления. На рис. 2 представлены кривые разгона по каналам $\Delta v_1 \rightarrow \Delta C_{P1}$, $\Delta v_1 \rightarrow \Delta C_A$ при 20%-м ступенчатом изменении управления.

Анализ графиков показывает, что кривые разгона качественно совпадают, расхождение выходных переменных в установившемся состоянии не превышает $\pm 2\%$. Можно ожидать, что РС будет работоспособен на нелинейном объекте.

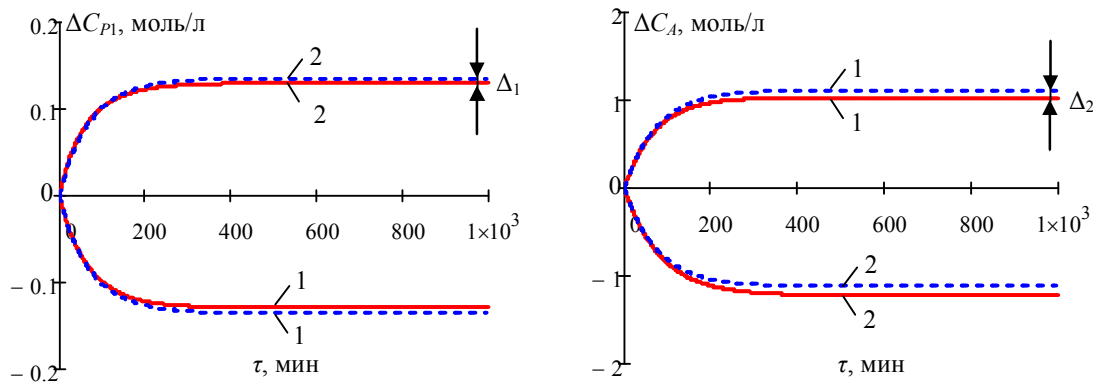


Рис. 2. Кривые разгона объекта по каналам $\Delta v_1 \rightarrow \Delta C_{P1}$, $\Delta v_1 \rightarrow \Delta C_A$ при использовании нелинейной модели (сплошная линия) и линеаризованной модели (пунктир): 1 - $\Delta v_1 = +0.2v_1^0$; 2 - $\Delta v_1 = -0.2v_1^0$

Структурно-параметрический синтез САУ концентрацией

Известно, что для объекта, заданного математической моделью вида (2), теория оптимального управления при использовании квадратичного критерия качества дает закон управления в виде безынерционного регулятора состояния, расположенного в обратной связи системы управления [9]:

$$u = -k\bar{x} = -k\Delta\bar{C}, \quad (3)$$

где $k = (k_1 \ k_2 \ k_3)$ – вектор-строка настроечных параметров. Численные значения настроек определяются путем решения уравнений Риккати, что является трудоемкой задачей.

Альтернативным подходом к определению настроек регулятора является использование метода модального управления [8]. По структуре алгоритм (3) является пропорциональным регулятором, который, как известно, не обеспечивает надлежащего отслеживания уставок или возмущающих воздействий по нагрузке в системе. Поэтому желательно введение в алгоритм управления интегральной составляющей, снижающей ошибку регулирования в статике. При этом число переменных состояния, для которых вводится интегральная составляющая, не должно превышать число управляющих воздействий. В нашем случае целесообразно ввести интегральную составляющую по концентрации целевого продукта ΔC_{P1} . Управление в этом случае определяется соотношением:

$$u = -(k_1 \Delta C_A + k_2 \Delta C_B + k_3 \Delta C_{P1}) - k' \int_0^\infty \Delta C_{P1} d\tau. \quad (4)$$

Структура одноканальной САУ с учетом изложенного представлена на рис. 3.

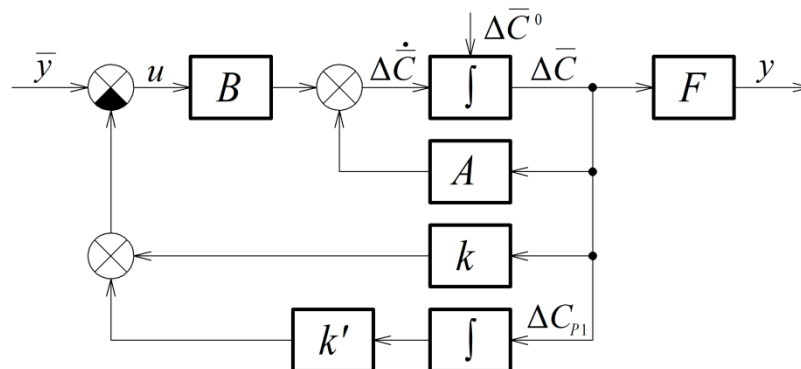


Рис. 3. Структура САУ состоянием химического реактора с учетом интегральной составляющей по концентрации ΔC_{P1}

Параметрический синтез безынерционного регулятора (3) методом модального управления осуществлялся с использованием процедуры перехода от исходного описания объекта (2) к представлению в канонической управляемой форме (КУФ):

$$\frac{d\Delta\hat{C}}{d\tau} = \hat{A}\Delta\hat{C} + \hat{b}u; \quad (5)$$

$$u = -\hat{k}\Delta\hat{C}, \quad (6)$$

где $\hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 \end{bmatrix}$ – сопровождающая матрица характеристического полинома

исходной матрицы A : $\varphi_A(s) = s^3 + a_2s^2 + a_1s + a_0$, $a_0 = 7.78 \cdot 10^{-6}$, $a_1 = 1.38 \cdot 10^{-3}$, $a_2 = 7.3 \cdot 10^{-2}$; $\hat{b} = (0 \ 0 \ 1)^T$ – вектор управления.

Желаемый характеристический полином с желаемым спектром собственных чисел имеет вид: $D(s) = s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0 = s^3 + 3\omega_0s^2 + 3\omega_0^2s + \omega_0^3$. Параметр ω_0 , определяющий время переходного процесса управления (τ_p), определим из соотношения [8]: $\omega_0 = \tau_0 / \tau_p$. При $\tau_p = 325$ мин получим $\omega_0 = 6/325 = 0.0185$.

Элементы вектора $\hat{k}$ в (6) определяются соотношениями:

$$\hat{k}_{i+1} = d_i - a_i, \quad i = 0, 1, 2; \quad \hat{k}_1 = -2.03 \cdot 10^{-6}; \quad \hat{k}_2 = -4.14 \cdot 10^{-4}; \quad \hat{k}_3 = 1.9 \cdot 10^{-2}.$$

Переход к коэффициентам обратной связи исходной системы (2) осуществляется по уравнению:

$$k = \hat{k}P_u, \quad (7)$$

где $P_u = \hat{M}_u M_u^{-1}$ – матрица преобразования исходной системы (2) к КУФ (5); $M_u, \hat{M}_u$ – матрица управляемости объекта, заданного исходной моделью (2) и моделью в КУФ (5).

Параметры регулятора состояния исходного объекта согласно (7) примут значения: $k_1 = -1.25$; $k_2 = -15.58$; $k_3 = 3.29$. Таким образом, управляющее воздействие запишется:

$$u = 1.25\Delta C_A + 15.58\Delta C_B - 3.29\Delta C_{P1}. \quad (8)$$

Настройки РС с интегральной составляющей определялись по методике, приведенной в [10]. Выражение (4) в явном виде запишется:

$$u = 2.26\Delta C_A + 16.08\Delta C_B + 10.05\Delta C_{P1} + 0.088 \int_0^\infty \Delta C_{P1} d\tau. \quad (9)$$

Исследование работоспособности СУ путем компьютерного моделирования

Регуляторы состояния синтезированы с использованием линеаризованной модели объекта, а функционировать система управления будет на реальном нелинейном объекте. Поэтому моделирование САУ проводили с использованием исходной нелинейной модели (1). Исследовались свойства САУ подавлять внешние возмущения, отслеживать изменение задания (ΔC_{PI}) и способность подавлять параметрические возмущения по константе скорости (ΔK_I).

В качестве показателей качества процессов управления использовали время регулирования и величину статической ошибки.

На рис. 4 приведены примеры процессов управления при действии внешнего возмущения по входной концентрации исходного реагента B : $\Delta C_{Bвх} = -0.1C_{Bвх}$.

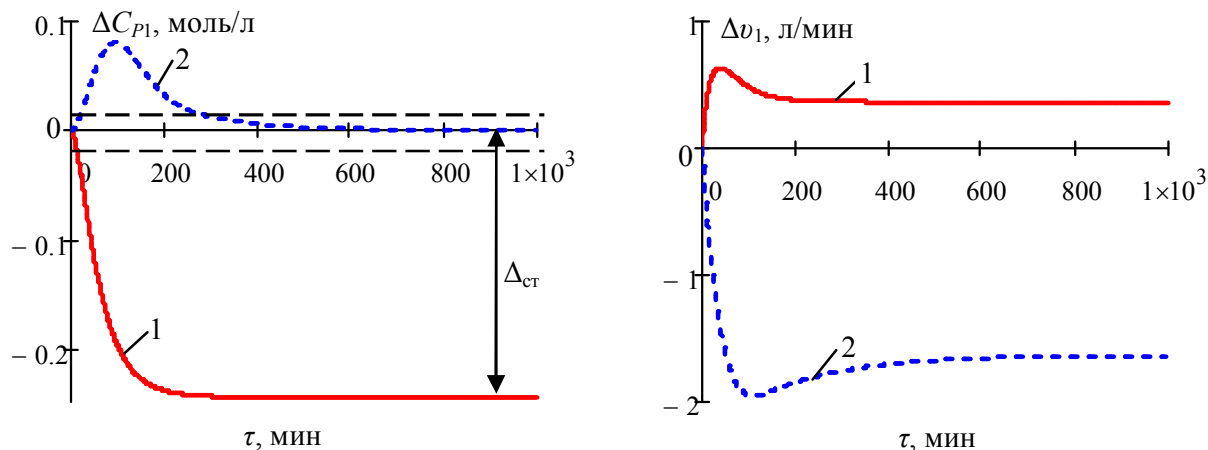


Рис. 4. Переходные процессы управления при внешнем возмущении $\Delta C_{B_{вх}} = -0.1 C_{B_{вх}} = -0.5$ моль/л:
1 – безынерционный РС; 2 – РС с интегральной составляющей

Анализ результатов показывает, что САУ на базе безынерционного РС не является инвариантной к возмущению, так как изменение выходной регулируемой переменной ΔC_{P1} характеризуется наличием недопустимой статической ошибки, в то время как РС с интегральной составляющей успешно компенсирует возмущение $\Delta C_{B_{вх}}$ без статической ошибки.

Аналогичная картина наблюдается при исследовании САУ на ковариантность с заданием по ΔC_{P1} . Установлено, что РС с интегральной составляющей отслеживает изменение задания по $\Delta C_{P1} = 15\%$ от установившегося значения без статической ошибки. Безынерционный РС характеризуется наличием существенной ошибки регулирования в статике.

Особое внимание уделено исследованию робастности. На рис. 5 приведены переходные процессы управления при 30%-м ступенчатом возмущении по параметру K_1 : $\Delta K_1 = 0.3 K_1$.

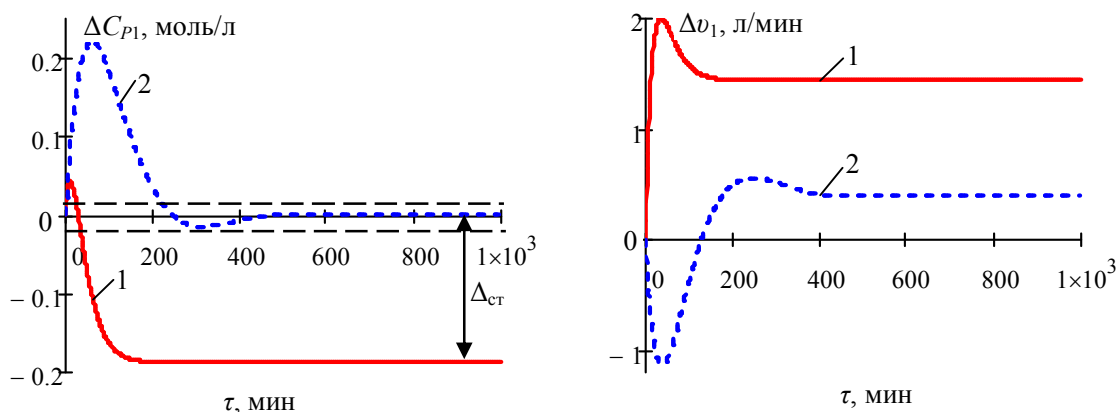


Рис. 5. Процессы управления при параметрическом возмущении $\Delta K_1 = 0.3 K_1$:
1 – безынерционный РС; 2 – РС с интегральной составляющей

Характер кривых на рис. 5 показывает, что оба варианта САУ обладают свойством устойчивости, но по величине статической ошибки регулирования безынерционный РС следует отвергнуть.

Таким образом, сравнительный анализ качества процессов управления показывает, что работоспособной следует признать САУ на базе РС с интегральной составляющей.

В работе была исследована работоспособность САУ при отсутствии текущих измерений концентраций компонентов A и B ($\Delta C_A = 0$; $\Delta C_B = 0$). Алгоритм управления в этом случае представляет собой одномерный ПИ-закон:

$$u = 10.05\Delta C_{P1} + 0.088 \int_0^{\infty} \Delta C_{P1} d\tau.$$

Исследования показали, что САУ и в этом случае является работоспособной: компенсирует 10%-ое возмущение по $\Delta C_{B_{вх}}$, отслеживает изменение задания по ΔC_{P1} на 15 % и компенсирует 30%-ое параметрическое возмущение по параметру K_1 .

Заключение

В работе предложена САУ концентрацией веществ в химическом реакторе на базе регулятора состояний, синтезированного методом модального управления. Методом компьютерного моделирования комплекса «нелинейный объект – линейная подсистема управления» показана работоспособность САУ на базе РС с интегральной составляющей, как для случая полного измерения вектора состояния, так и случая измерения только выходной переменной.

Список литературы:

References:

- 1 Синергетика и проблемы теории управления. Под ред. Колесникова А.А. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 504 с.
2. Chitturi A., Ravi P.S. PID control of integrating systems using Multiple Dominant Poleplacement method // Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. 2015. V. 10. N. 5. P. 734-742.
3. Krishna D., Suryanarayana K., Aparna G., Sree R.P. Tuning of PID Controllers for Continuous Stirred Tank Reactors // Indian Chemical Engineer. 2012. V. 54. N. 3. P. 157-179.
4. Анисимов А.А., Котов Д.Г., Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Анализ параметрической чувствительности и структурная оптимизация систем модального управления с регуляторами состояния // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2011. № 5. С. 18-32.
5. Тютиков В.В., Котов Д.Г., Тарарыкин С.В. Условия параметрической грубости САУ с регуляторами состояния // Известия ТРТУ. 2005. № 1(45). С. 53-62.
6. Котов Д.Г., Тарарыкин С.В., Тютиков В.В. Синтез линейных регуляторов для управления состоянием технических объектов. Иваново: ГОУВПО «ИГЭУ», 2005. 172 с.
7. Вершинин И.В., Тютиков В.В. Синтез параметрически грубых систем модального управления // Энергия-2015. Десятая международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых. Сборник конкурсных докладов. 2015. С. 134-137.
1. *Sinergetika i problem teorii upravleniya* [Synergetics and control theory issues]. Ed. by Kolesnikov A.A. Moscow: FIZMATLIT, 2004. 504 p. [in Russian]
2. Chitturi A., Ravi P.S. PID control of integrating systems using Multiple Dominant Poleplacement method // Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering. 2015. V. 10. N. 5. P. 734-742.
3. Krishna D., Suryanarayana K., Aparna G., Sree R.P. Tuning of PID Controllers for Continuous Stirred Tank Reactors // Indian Chemical Engineer. 2012. V. 54. N. 3. P. 157-179.
4. Anisimov A.A., Kotov D.G., Tararykin S.V., Tyutikov V.V. Analiz parametricheskoy chuvstvitel'nosti i strukturnaya optimizaciya system modal'nogo upravleniya s regulyatorami sostoyaniya [Parametric sensitivity analysis and structural optimization of modal control systems with state controllers]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya*. 2011. no. 5. pp. 18-32. [in Russian]
5. Tyutikov V.V., Kotov D.G., Tararykin S.V. Usloviya parametricheskoy grubosti SAU s regulyatorami sostoyaniya [Parametric robustness conditions of ACS with state controllers]. *Izvestiya TRTU*. 2005. no. 1(45). pp. 53-62. [in Russian]
6. Kotov D.G., Tararykin S.V., Tyutikov V.V. *Sintez linejnyh reguljatorov dlya upravleniya sostojaniem tekhnicheskix ob'ektov* [Synthesis of linear regulators for state control of technical objects]. Ivanovo: GOUVPO «IGEУ», 2005. 172 p. [in Russian]
7. Vershinin I.V., Tyutikov V.V. Sintez parametricheski grubyh system modal'nogo upravleniya [Synthesis of parametrically robust modal control systems]. *Energiya-2015. Desyataya mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya studentov, aspirantov i molodyh uchenyh. Sbornik konkursnyh dokladov*. 2015.

8. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т. 2. Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления. Под ред. Егупова Н.Д. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 736 с.

9. Ли Э.Б., Маркус Л. Основы теории оптимального управления. М.: Наука, 1972. 576 с.

10. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976. 184 с.

pp. 134-137. [in Russian]

8. *Metody klassicheskoy i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya* [Methods of classical and modern automatic control theory]. vol. 2. *Sintezregulyatoroviteoriyaoptimizacii sistemavtomaticheskogo upravleniya* [Regulator synthesis and automatic control system optimization theory]. Ed. by Egupov N.D. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 2000. 736 p. [in Russian]

9. Lee E.B., Markus L. Foundations of optimal control theory. New York: Wiley, 1967. 576 p.

10. Kuzovkov N.T. *Modal'noe upravlenie i nablyudayushchie ustrojstva* [Modal control and observers]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1976. 184 p. [in Russian]

Статья поступила в редколлегию 18.06.19.

Рецензент: д.т.н., доцент,

Брянский государственный технический университет

Аверченков А.В.

Статья принята к публикации 30.10.19.

Сведения об авторах

Лабути́н Александр Николаевич

доктор технических наук, профессор кафедры

«Техническая кибернетика и автоматика»

Ивановского государственного химико-технологического университета

Тел.: 8-910-985-43-05.

E-mail: lan@isuct.ru

Зага́ринская Юлия Николаевна

магистрант кафедры «Техническая кибернетика и автоматика» Ивановского государственного химико-технологического университета.

Тел.: 8-4932-32-72-26

E-mail: julia-zagarinskaya@yandex.ru

Невини́цын Владимир Юрьевич

кандидат технических наук, доцент кафедры

«Техническая кибернетика и автоматика»

Ивановского государственного химико-технологического университета.

Тел.: 8-915-837-94-53.

E-mail: nevinityn@gmail.com

Волкова Галина Витальевна

кандидат технических наук, доцент кафедры

«Техническая кибернетика и автоматика»

Ивановского государственного химико-технологического университета

Тел.: 8-4932-32-72-26.

E-mail: konf_gv@mail.ru

Information about authors:

Labutin Alexander Nikolaevich

Doctor of Technical Sciences, Professor

Head of Chair, department of «Technical Engineering

Cybernetics and Automation», Ivanovo State University of Chemistry and Technology

Phone: 8-4932-32-72-26.

E-mail: lan@isuct.ru.

Zagarinskaya Yulia Nikolaevna

graduate student, department of «Technical Engineering Cybernetics and Automation», Ivanovo State University of Chemistry and Technology

Phone: 8-4932-32-72-26.

E-mail: julia-zagarinskaya@yandex.ru

Nevinityn Vladimir Yurievich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Associate Professor, department of «Technical

Engineering Cybernetics and Automation », Ivanovo State University of Chemistry and Technology.

Phone: 8-4932-32-72-26.

E-mail: nevinityn@gmail.com

Volkova Galina Vitalievna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

Associate Professor, department of «Technical

Engineering Cybernetics and Automation », Ivanovo State University of Chemistry and Technology.

Phone: 8-4932-32-72-26.

E-mail: konf_gv@mail.ru

УДК: 539.3

DOI: 10.30987/2658-3488-2019-2019-4-12-16

М.В. Жигалов, В.А. Апрыскин, В.А. Крысько

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАНОБАЛОК

В статье построена математическая модель размерно-зависимого поведения линейной балки Бернулли на основе градиентной теории деформаций. Проведено исследование нелинейной динамики контактного взаимодействия. Исследована синхронизация колебаний на основе вейвлет-анализа.

Ключевые слова: балка Бернулли-Эйлера, размерно-зависимое поведение, градиентная теория упругости, синхронизация колебаний.

M.V. Zhigalov, V.A. Apryskin, V.A. Krysko

INVESTIGATION OF NANOBEAM CONTACT INTERACTION SYNCHRONIZATION

The paper presents a mathematical model of the size-dependent behavior of a linear Bernoulli beam based on the gradient deformation theory. The study of nonlinear dynamics of contact interaction is carried out. The synchronization of oscillations on the basis of wavelet analysis is investigated.

Keywords: Bernoulli-Euler beam, size-dependent behavior, gradient theory of elasticity, synchronization of oscillations.

Введение

Многослойные структуры из балок соединенные через краевые условия являются составными элементами полноразмерных конструкций в космическом, авиа-, судо- и приборостроении, а так же нано размерных элементов наноэлектромеханических систем, которым приходится работать в экстремальных режимах работы. Поэтому важно изучение влияния управляющих параметров, величины внешней нагрузки на их функционирование.

Впервые задача о контакте упругих тел, первоначально соприкасающимися в точке была сформулирована и решена Г.Герцем [1] в 1882. Развитие техники поставило проблему контактных задач в ряд актуальных в механике деформируемого твердого тела. Сложность этих задач обусловило большое число подходов и математических методов при их решении. Принимая во внимание различные условия контакта, связанные с более сложными законами поведения, приводят к внедрению новых и нестандартных моделей, выражаемых с помощью эволюционных вариационных неравенств. Современное состояние исследований зарубежных ученых по данному вопросу можно найти в [2]. В работе [3] рассмотрена контактная задача без трения для конструкции, состоящей из двух балок Бернулли – Эйлера с различными длинами и различными переменными толщинами. Один конец короткой балки зашцеplen; совпадающий с ним конец длинной балки закреплен шарнирно. Второй конец каждой балки свободен. К длинной балке приложена заданная нагрузка. Под действием этой нагрузки балки испытывают слабый совместный изгиб с возможным отставанием, то есть имеется односторонний контакт. В статье [4] представлены результаты использования методов теории оболочек для решения задач определения напряженно-деформированного состояния и долговечности тонкостенных конструкций. Показано, что одной из разновидностей задач для оболочек, которые часто встречаются при расчете различных технических объектов, являются задачи с подвижными границами – контактные задачи. В статье рассмотрен один из эффективных способов решения контактных задач для оболочек вращения – метод виртуальных элементов. В отличие от метода конечных элементов

увеличение количества виртуальных элементов не увеличивает размер матрицы жесткости конструкции. Исследованию контактного взаимодействия нано балок и нано пластин по модифицированной моментной теории посвящены работы [5-7].

1. Постановка проблемы

Основываясь на теории напряжений более высокого порядка Mindlin[7] и Lametal. [8] построена математическая модель нано балок Бернулли-Эйлера, соединенных через краевые условия, под действием поперечной нагрузки. Для учета размерных эффектов вводятся три параметра шкалы длины материала (l_0, l_1, l_2) . Для учета контакта между балками, используется винклера связь между обжатием и контактным давлением между двумя балками [9]:

$$\Psi = \frac{1}{2} \left[1 + \text{sign}(w_1 - h_k - w_2) \right] \quad (1)$$

где $\Psi = 1$, если $W_1 > w_2 + h_k$ то есть имеется контакт между пластиной и балкой, иначе $\Psi = 1$.

Математическая модель контакта двух нано балок, на основе кинематической гипотезы Бернулли-Эйлера, описывается системой разрешающих уравнений:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^4 w_m}{\partial x^4} \left((\lambda + 2\mu) \frac{bh^3}{12} + l_0^2 \mu bh + l_2^2 \mu bh + \frac{96}{225} l_1^2 \mu bh \right) - \\ & - \frac{\partial^6 w_m}{\partial x^6} \left(2l_0^2 \mu \frac{bh^3}{12} + \frac{14}{225} l_1^2 \mu \frac{bh^3}{12} \right) - q_m + (-1)^m K(w_1 - w_2 - \tilde{h})\Psi = \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \varepsilon \frac{\partial w}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

где m – номер балки ($m=1,2$), $\tilde{h}$ – зазор между балками. Система (2) с помощью соотношений:

$$\begin{aligned} \bar{w} &= w/(2h), \quad \bar{u} = ua/(2h)^2, \quad \bar{x} = x/a, \quad \lambda = a/(2h), \quad \bar{q} = (qa^4)/(2h)^4 E, \\ \bar{t} &= t/\tau, \quad \tau = a/c, \quad c = \sqrt{Eg/9}, \quad \bar{\varepsilon} = \varepsilon a/c, \end{aligned} \quad (3)$$

сводится к безразмерному виду. Граничные условия имеют вид:

$$w_m = 0; \quad \frac{\partial w_m}{\partial x} = 0. \quad (4)$$

Начальные условия имеют вид:

$$w_m(x, 0) = 0; \quad \frac{\partial w_m(x, 0)}{\partial t} = 0. \quad (5)$$

Система (2, 4,5) сводилась к задаче Коши с помощью метода конечных разностей $O(h^2)$. Задача Коши решалась методом Рунге-Кутты 4 порядка. Проведено исследование сходимости по методу конечных разностей, на основании которого выбрано оптимальное количество разбиений. Шаг разбиений для метода Рунге-Кутты определялся по принципу Рунге.

Получаемые в результате решения динамической задачи, описанный выше, значения $w(x,t)$, анализируются методами качественной теории дифференциальных уравнений и нелинейной динамики: строятся фазовые портреты, спектры мощности, полученные с помощью быстрого преобразования Фурье, энергетические спектры вейвлетного преобразования в зависимости от времени и масштабного параметра в двумерном пространстве, разность фаз - для анализа режима фазовой хаотической синхронизации.

Применение вейвлет-преобразования хаотического сигнала $w_i(t)$ рассматриваемой механической системы, характеризуемого плохой определемостью фазы, дает возможность разработать новый метод выявления фазовой синхронизации. Запишем вейвлетную поверхность $W(s, t) = |W(s, t)| e^{i\phi_s(t)}$, которая характеризует поведение механической системы на каждом временном масштабе s в любой момент времени t . Введем так же интегральное распределение энергии вейвлетного спектра по временным масштабам $E(s) = \int |W(s, t)|^2 dt$. Использование вейвлетного преобразования дает возможность вычислить фазу $\phi_s(t) = \arg W(s, t)$ для каждого временного масштаба s , т.е. возможно характеризовать поведение каждого временного масштаба с помощью ассоциированной с ним фазы. Следует отметить, что фазовая синхронизация означает, что происходит захват хаотических сигналов, в то время как амплитуды этих сигналов остаются несвязанными друг с другом и выглядят хаотическими. Захват фаз влечет за собой совпадение частот сигналов. Частота хаотического сигнала определяется как средняя скорость изменения фазы $\langle \phi(t) \rangle$. Синхронизированными оказываются те временные масштабы, на которые приходятся наибольшие доли энергии $E(s)$. Остальные временные масштабы по-прежнему остаются несинхронизированными. При этом, фазовая синхронизация ведет к появлению и захвату фаз на синхронизированных временных масштабах $s: |\phi_1 - \phi_2| < const$, здесь ϕ_1, ϕ_2 - непрерывные фазы 1 и 2 балки, соответствующие синхронизированным временным масштабам s . В численных примерах графически эти зоны отмечаются черным цветом.

2. Численные результаты

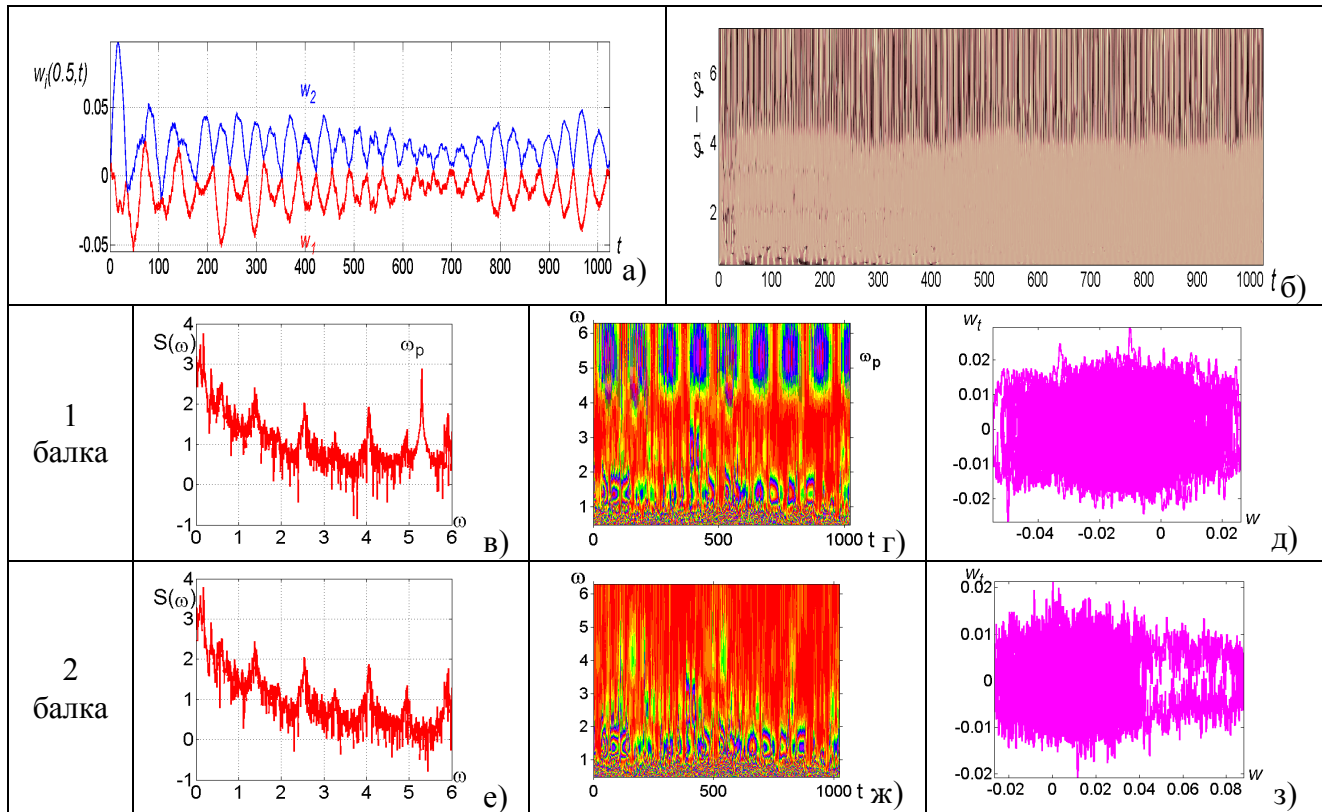
Для рассмотренных задач использовались следующие значения параметров: $\varepsilon = 0.01$, $\tilde{h} = 0.01$, $q_1 = 300 \sin(5.3 \cdot t)$, $q_2 = 0$, $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0.3$.

В таблице 1 представлены результаты исследований для случая когда все безразмерные параметры $t \approx 400$ равны 0.3. Приведены следующие характеристики колебаний: ф) сигналы 1 и второй балок; б) фазовая хаотическая синхронизация колебаний; в) и е) спектры Фурье для 1 и 2 балок соответственно; г) и ж) 2D вейвлет спектры на базе вейвлета Морле; д) и з) фазовые портреты.

График сигналов показывает, что балки контактируют на всем временном интервале и начиная со времени $t \approx 350$ сигналы имеют зеркальный вид. Таким образом энергии колебаний обеих балок равны. На это указывает и график фазовой хаотической синхронизации – начиная с этого времени синхронизация (темный цвет) происходит на частоте возбуждения. До момента времени синхронизация колебаний происходила на более широком диапазоне частот и как показывают вейвлет спектры (г и ж) энергия первой балки существенно больше чем энергия второй. Спектр Фурье обоих балок показывает, что колебания первой и второй балок существенно хаотичны, но энергия имеет «пики» на одних и тех же частотах: $\omega_1 = 0.2$, $\omega_2 = 1.2$, $\omega_3 = 2.3$, $\omega_4 = 4$, $\omega_5 = 5$. Вейвлет спектр второй балки указывает на то, что наибольшее значение энергии колебаний (соответствующая квадрату вейвлет коэффициентов $E(s) = \int |W(s, t)|^2 dt$) сосредоточено на низких частотах $\omega \leq 3$. На более высоких частотах имеются одномоментные всплески активности, соответствующие переходным процессам, хорошо заметным на графике сигналов а). Вид фазовых портретов для обоих балок несимметричен относительно нуля по оси w и имеет сдвиг для первой балки в сторону отрицательных прогибов, а для второй в сторону положительных прогибов, что указывает опять же на симметричность колебаний балок. Отметим интересную особенность колебательного процесса. В момент времени $t \approx 400$ на вейвлет спектре обеих балок на

частотах $2 < \omega < 3.5$ происходит всплеск энергии, который приводит к усложнению сигнала, т.е. его вид становится более хаотичным – это видно графике сигналов а). После $t \approx 850$ сигнал становится более стабильным. Хотя колебания так же остаются хаотическими.

Таблица 1. Характеристики нелинейной динамики контактного взаимодействия нано балок Бернулли-Эйлера



Выводы

В работе построена математическая модель контактного взаимодействия нанобалок Бернулли-Эйлера на основе градиентной теории упругости. Проведено исследования динамики при одном значении трех параметров шкалы длины материала. Выявлены интересные особенности контактного взаимодействия нано балок. Изучение фазовой хаотической синхронизации выявило связь между всеми характеристиками колебаний (Фурье и вейвлет спектры, фазовый портрет и сигнал) и фазовой синхронизацией. Это позволяет сделать вывод о необходимости дальнейших углубленных исследований в области фазовой хаотической синхронизации контактного взаимодействия нано балок.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 16-11-10138-П.

Список литературы:

1. Hertz H. Gesammelte Werke. Bd. 1. Leipzig, 1895.
2. Banks H. T., Hu S., Kenz Z. R. A brief review of elasticity and viscoelasticity for solids // Advances in Applied Mathematics and Mechanics. 2011. 3(1). P. 1-51
3. Осипенко М.А., Касаткин А.А. Моментная контактная нагрузка при одностороннем контакте балок // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика.

References:

1. Hertz, H. Gesammelte Werke. Bd. 1. Leipzig, 1895.
2. H. T. Banks, S. Hu, Z. R. Kenz, A brief review of elasticity and viscoelasticity for solids // Advances in Applied Mathematics and Mechanics. 2011. 3(1). P. 1-51
3. Osipenko M. A., Kasatkin A. A. torque load at the contact unilateral contact beams // proceedings of the Saratov University. New series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics. 2019. T. 19. No. 1. Pp. 69-81.

2019. Т. 19. № 1. С. 69-81.

4. Emelyanov I. G. Mechanics of shells and its applications // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2018. 2. P. 6–28.
5. Krysko V.A., Awrejcewicz J., Papkova I.V., Saltykova O.A., Krysko A.V., Chaotic contact dynamics of two microbeams under various kinematic hypotheses // International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation. 2019. 20(3-4). P. 373-386
6. Krysko V.A., Awrejcewicz J., Saltykova O.A., Papkova I.V., Krysko A.V., On the contact interaction of a two-layer beam structure with clearance described by kinematic models of the first, second and third order approximation. Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. 115. P. 696-719
7. Mindlin RD. Second gradient of strain and surface-tension in linear elasticity. Int J Solids Struct. 1965;1:417-38.
8. Yang F, Chong ACM, Lam DCC, Tong P. Couple stress based strain gradient theory for elasticity. Int J Solids Struct. 2002;39:2731-43.
9. Кантор Б.Я. Метод решения контактных задач нелинейной теории оболочек / Б.Я. Кантор, Т.Л. Богатыренко // Докл. АН УССР.сер. А. 1986. №1. С.18-21.

4. Emelyanov I. G. Mechanics of shells and its applications // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2018. 2. P. 6-28.
5. Krysko V. A., Awrejcewicz J., Papkova I. V., Saltykova O. A., Krysko A.V., Chaotic contact dynamics of two microbeams under various kinematic hypotheses / / International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation. 2019. 20(3-4). P. 373-386
6. Krysko V. A., Awrejcewicz J., Saltykova O. A., Papkova I. V., Krysko A.V., On the contact interaction of a two-layer beam structure with clearance described by kinematic models of the first, second and third order approximation. Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. 115. P. 696-719
7. Mindlin RD. Second gradient of strain and surface-tension in linear elasticity. Int J Solids Struct. 1965;1:417-38.
8. Yang F, Chong ACM, Lam DCC, Tong P. Couple stress based strain gradient theory for elasticity. Int J Solids Struct. 2002;39:2731-43.
9. Kantor B. ya. Method for solving contact problems of nonlinear shell theory / B. Ya. Kantor, T. L. Bogatyrenko // Dokl. UKRAINIAN ACADEMY OF SCIENCES. ser. A. 1986. No. 1. Pp. 18-21.

Статья поступила в редколлегию 10.10.19.

Рецензент: д.т.н., доцент,

Брянский государственный технический университет

Захарова А.А.

Статья принята к публикации 10.11.19.

Сведения об авторах:

Жигалов Максим Викторович

д.ф.-м.н., доцент

профессор кафедры «Математика и моделирование» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина»

Тел.: +7 (8452) 99-87-24

E-mail: zhigalovm@yandex.ru

Апрыскін Виктор Александрович

магистр кафедры «Математика и моделирование»

ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина»

Тел.: +7 (8452) 99-87-24

E-mail: wwooow@yandex.ru

Крысько Вадим Анатольевич

д.т.н., профессор

заведующий кафедрой «Математика и моделирование» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина»

Тел.: +7 (8452) 99-87-24

E-mail: anton.krysko@gmail.com

Information about authors:

Zhigalov Maxim Viktorovich

Doctor of physical-mathematical science, associate

Professor

Professor of the Department «Mathematics and modeling» FSBEI HE «Yuri Gagarin State Technical University of Saratov»

Phone: +7 (8452) 99-87-24

E-mail: zhigalovm@yandex.ru

Apryskin Victor Alexandrovich

master of Department «Mathematics and modeling»,

FSBEI HE «Yuri Gagarin State Technical University of Saratov»

Phone: +7 (8452) 99-87-24

E-mail: wwooow@yandex.ru

Krysko Vadim Anatolievich

Doctor of Technical Sciences, Professor

Head of the department "Mathematics and modeling" FSBEI HE «Yuri Gagarin State Technical University of Saratov »

Phone: +7 (8452) 99-87-24

E-mail: kryskovadim@gmail.com

УДК: 621.039.58

DOI: 10.30987/2658-3488-2019-2019-4-17-24

М.А.Берберова, А.С. Обоймов, А.Ю. Федорова, П.А. Росщупкина, А.А. Белая

РИСК-ИНФОРМИРОВАННАЯ СИСТЕМА БЕЗОПАСНОСТИ

В условиях сложной криминогенной обстановки в мире с учетом глобализации процессов мирового развития, международных политических и экономических отношений, формирующих новые риски для развития личности, общества и государства. В Российской Федерации, как и во всем мире, неуклонно возрастают угрозы безопасности промышленных объектов.

При этом в связи с повышением организованности и расширением технической оснащенности потенциальных нарушителей (террористов, экстремистов и т.д.), совершенствованием способов и методов противоправных действий особую актуальность приобретают вопросы, связанные с рационализацией технологий, направленных на защиту жизненно-важных интересов и ресурсов предприятий.

К одной из таких технологий относится создание эффективной автоматизированной системы охраны и противодействия от несанкционированного проникновения физических лиц - системы физической защиты, технически основанной на комплексе инженерно-технических средств.

Процесс проектирования комплекса инженерно-технических средств системы физической защиты промышленных объектов включает два основных этапа: концептуальное и рабочее проектирование, при этом именно от успешного проведения работ на стадии концептуального проектирования зависит оптимальность проектно-технических решений в целом.

Ключевые слова: риск, система безопасности, система физической защиты, риск-информированная система безопасности.

M.A. Berberova, A.S. Oboymov, A.Yu. Fedorova, P.A. Rosshchupkina, A.A. Belaya

RISK-INFORMED SECURITY SYSTEM

Under the conditions of a difficult criminal situation in the world, taking into account the globalization of world development processes, international political and economic relations, which pose new risks for the development of the individual, society and the state. In the Russian Federation, as elsewhere in the world, threats to the safety of industrial facilities are steadily increasing.

At the same time, in connection with improving the organization and expanding the technical equipment of potential violators (terrorists, extremists, etc.), improving the methods and methods of illegal actions, issues related to the rationalization of technologies aimed at protecting the vital interests and resources of enterprises are particularly relevant.

One of such technologies includes the creation of an effective automated system for the protection and counteraction against unauthorized entry of individuals - a physical protection system technically based on a set of engineering and technical means.

The design process for the complex of engineering and technical means of the physical protection system of industrial facilities includes two main stages: conceptual and detailed design, and the optimality of design and engineering solutions as a whole depends on the successful implementation of work at the conceptual design stage.

Keywords: risk, security system, physical protection system, risk-informed safety system.

Введение

Модель системы физической защиты (СФЗ) состоит из нескольких компонентов: модель нарушителя, модель объекта. Модель нарушителя представляет собой совокупность стратегии действий нарушителя и матриц навыков: матрицу вероятностей $P(11)$ и матрицу времен $T(12)$.

$$P = (p_{1,1} p_{1,2} \dots p_{1,n} p_{2,1} p_{2,2} \dots p_{2,n} \dots \dots \dots p_{m,1} p_{m,2} \dots p_{m,n}) \quad (1)$$

Элементом матрицы вероятностей $P_{i,j}$ является вероятность обнаружения нарушителя при преодолении элемента СФЗ i -го типа, используя j -й навык из набора навыков нарушителя.

Элементом матрицы времен $T_{i,j}$ является время преодоления элемента СФЗ i -го типа, используя j -й навык из набора навыков нарушителя.

$$T = (T_{1,1} T_{1,2} \dots T_{1,n} T_{2,1} T_{2,2} \dots T_{2,n} \dots \dots \dots T_{m,1} T_{m,2} \dots T_{m,n}) \quad (2)$$

В современных условиях культура физической безопасности ядерных объектов привлекает к себе повышенное внимание. Помимо других преимуществ, эффективная культура безопасности требует от персонала активных действий и инновационных подходов в условиях, когда угрозы и риски слишком многочисленны, чтобы их все могли предсказать даже самые дальновидные лидеры [1, 2].

В 2007 году общественность США была шокирована известием, что несколько профессиональных охранников были обнаружены спящими на своих постах при несении службы по охране АЭС Peach Bottom [2, 3]. Приблизительно в это же время четверо вооруженных злоумышленников ворвались на ядерную установку Pelindaba в ЮАР, где хранились сотни килограммов оружейного урана. Преступникам удалось отключить несколько уровней физической защиты объекта, однако они не были обнаружены охраной, потому что никто не следил за камерами наблюдения. После распада Советского Союза сотни радиоактивных источников, представляющих серьезную опасность для населения и содержащих радиоизотопы, которые могут быть использованы для создания «грязных» бомб, были брошены на территории ряда новообразовавшихся государств. Такие источники, наносящие вред здоровью людей и состоянию окружающее среды, до сих пор ежегодно изымаются из удаленных районов Грузии. Эти и другие, на первый взгляд случайные и не связанные между собой, инциденты имеют, тем не менее, одну общую критическую черту – «сбой» человеческого фактора.

Итальянские психологи утверждают, что из всех служащих любой фирмы 25 % - это честные люди, 25 % - ожидают удобного случая для разглашения секретов, и 50 % будут действовать в зависимости от обстоятельств [2, 4].

В 1994 году трое репортеров лондонской газеты «Санди Таймс» провели эксперимент. Представляясь бизнесменами, они вышли на двадцать депутатов британского парламента с предложением направить в правительство запрос, в котором они заинтересованы и получить за это наличными или чеком тысячу фунтов стерлингов. Из двадцати 27 сразу отказались, трое согласились. Аналогичные эксперименты проводила ФБР в начале 80-х гг.: агенты ФБР под видом арабских шейхов обращались к членам американского конгресса, предлагая им вознаграждение в десятки тысяч долларов за то, чтобы «шейхам» были устроены всякие поблажки [2, 4].

Отсюда следует вывод, что вероятность «отказа» охраны или диспетчера на пульте в результате подкупа достаточно высока. А ведь возможны еще и сценарии с ликвидации охраны КПП в результате боевого столкновения или ошибки диспетчера.

Не меньшей проблемой является предсказание действий людей в экстремальной ситуации, подобной нападению на объект нарушителей. Даже несмотря на скрупулезно разработанные инструкции и естественную логику поведения, человек в экстремальных условиях довольно часто ведет себя абсолютно непредсказуемо, иногда вообще сводя к нулю эффективность всей системы [1, 2].

Нарушение инструкции порой обходится гораздо дороже выхода из строя дорогостоящей видеокамеры или компьютера. По статистике, крупнейшие пожары начинаются с возгорания, на которое не реагируют дежурные смены специалистов. Большинство ограблений инкассаторов происходит при нарушении ими несложных служебных инструкций. Охраняемые офисы, рестораны, магазины «сдают» преступникам психологически неподготовленные охранники. Больше половины конфиденциальной

информации распространяют свои же сотрудники, подталкиваемые личной неудовлетворенностью и несложными уловками заинтересованных лиц. Таких примеров можно привести ещё много. А если речь идет об объектах повышенного техногенного риска, а в особенности, объектов ядерной энергетики, то вопрос надежности персонала вообще и персонала физической защиты в частности становится критическим.

Для задач, связанных с физическим противодействием в конфликтных ситуациях, эта проблема крайне актуальна. Предполагать отсутствие криминальных угроз охраняемым объектам невозможно, этому противоречат результаты анализа СФЗ, этому противоречит сам факт создания СФЗ. Конечно, руководитель службы безопасности уверяет руководство или владельца объекта и должен быть сам уверен, что работник охраны строго выполнит утвержденную служебную инструкцию и в условиях криминальных или террористических угроз обеспечит безопасность, не нарушая при этом законодательства и обязательств, принятых охраной. Особенно это важно при применении оружия. Тем не менее, для большинства руководителей охраны поведение охранника в той или иной нештатной ситуации остается загадкой. Так, например, зашедшие в бутик двое подростков с пневматическим пистолетом истошным криком уложили на пол здорового охранника, один только внешний вид которого предполагал гарантированную защиту от взвода головорезов. Покуражившиеся среди витрин подростки потребовали и получили перстень с руки охранника. В процессе разбирательства причина произошедшего так и осталось невыясненной, охранная фирма потеряла объект, уволился охранник, сменилось руководство. Однако гарантии, что столь необъяснимое явление не повторится, даются после третьей «чашки чая» и стоят недорого. И опять же, если речь идет об объектах атомной энергетики - никакого «потом» может и не быть, ни для сотрудников службы безопасности, ни для её руководства.

Не вызывает сомнения тот факт, что профессиональная готовность структур безопасности зависит от поддержания и сохранения соответствующего психологического состояния их сотрудников. Специалисты из милицейских структур утверждают, что лишь 25 % сотрудников сохраняют способность разумно действовать в экстремальных условиях; 75 % временно утрачивают ее; 10 – 12 % утрачивают ее на длительное время. По данным психологов, каждый пятый сотрудник обречен на профессиональные психологические травмы. Психологическая неподготовленность является причиной неумения справиться в экстремальных условиях (73%). Только около 30% сотрудников рассматриваемых структур способны самостоятельно преодолевать кризисные события, сохраняя при этом целостность личности и внутреннее равновесие, способны противостоять так называемому явлению профессиональной деформации личности [1, 2].

Люди в экстремальных условиях, характерных для охранной деятельности, часто не могут действовать грамотно, и это общая закономерность. Довольно сложно найти «идеальных мужчин», нужно уметь работать с представителями большинства *homosapiens*, формируя из них профессионалов. Эту задачу можно эффективно решить только при организации психологической поддержки.

Однако в данной работе не вопрос психологической подготовки, а предлагается подойти к вопросу повышения уровня безопасности с другой стороны. На этапе проведения анализа эффективности СФЗ объекта, с использованием инструментов риск-информированного подхода, были описаны принципиально возможные нарушители, тактики и сценарии их действий, смоделированы как сценарии вторжения, так и сценарии контрдействий по нейтрализации нарушителя.

Задача удержания в памяти всех инструкций на все случаи действий нападающих, и, что важнее – задача своевременного обнаружения и распознавания несанкционированных, враждебных действий – эти задачи очень сложны для операторов и дежурных службы безопасности любого более-менее крупного объекта, этим в том числе объясняется высокая психологическая нагрузка на оператора. И эту задачу можно существенно упростить, если

обеспечить информационное сопровождение оператору, выдачей точных данных о текущем состоянии дел, помощью в обнаружении возможных нападений на ранней стадии, выдачей четких инструкций, что делать в том или ином случае.

1. Прототип риск-информированной системы безопасности

В рамках данной работы был разработан прототип риск-информированной системы безопасности, работающий по принципам, описанным выше.

В качестве основной системы, поставляющей информацию для обработки, была выбрана система видеонаблюдения. Современная видеоаналитика обладает впечатляющими возможностями, включающими распознавание людей, трекинг (слежение) за людьми, в том числе и в многокамерных системах, распознавание выделяющегося, подозрительного поведения, например, бег, праздничное поведение и многое другое [2, 5].

Однако, эти возможности во многом используются вхолостую, максимум, включая запись по обнаружению движущихся объектов и сигнализируя об этом оператору. Вся тяжесть дальнейшего анализа и принятия решений ложится исключительно на оператора. Однако, во-первых, как уже указывалось, эффективность работы оператора сильно зависит от времени суток, общей нагрузки, и многих других факторов и является недостаточной для многих случаев. А во-вторых, как показывает практика, часто операторы игнорируют происходящее на видеокамерах по привычке, например, после нескольких ложных срабатываний или после длительного периода отсутствия каких-либо попыток нарушить безопасность охраняемого объекта.

Разработанный прототип показывает принцип работы всей системы на примере одного помещения в здании.

Для демонстрации принципа работы всей системы рассматривается одно помещение – коридор. Вход в помещение охраняется сотрудником службы безопасности объекта, кроме того, вход в помещение блокируется замком, например кодовым. В помещении предполагается наличие некой «запретной» зоны, в которой находится какой-либо предмет физической защиты – цель нарушителя. Камера отслеживает происходящее в помещении в автоматическом режиме, без участия оператора. Данные с видеокамеры обрабатываются программой. В случае появления кого-либо в помещении, программа начинает трекинг обнаруженных людей, отслеживая все их действия и перемещения, одновременно анализируя их.

Для помещения построены дерево событий и дерево отказов, соответствующие проникновению нарушителя в запретную зону. Заданы начальные вероятности событий и отказов. Вероятности возможных итоговых событий и отказов вычисляются в соответствии с логическими операциями, гейтам дерева.

Если обнаруживается какое-либо из событий, внесенное в дерево событий, программа автоматически отмечает событие как произошедшее (его вероятность становится равной единице), пересчитывает всё дерево и сигнализирует о повышении уровня риска (а значит, и повышение уровня угрозы безопасности), если таковое обнаруживается. Все обнаруженные события, а также соответствующие им отказы регистрируются в системе, что позволит впоследствии, при необходимости, проследить развитие событий, проанализировать действия нарушителя и персонала СФЗ, выработать предложения по улучшению СФЗ и повышению эффективности.

Дерево событий в данной программе отображает следующие ключевые события:

- Наличие движения (рис. 1). Камера зафиксировала наличие движения в помещении. В первую очередь, это означает, что обнаруженный злоумышленник каким-то образом попал в помещение, а значит, произошел отказ замка на двери или отказ охранника на входе в помещение (либо охранник нейтрализован, либо он в сговоре с нарушителем).

- Движение к запретной зоне (рис. 2). Наличие движущегося к опасной зоне человека

ещё не означает автоматически, что он движется именно в сторону «запретной зоны», однако, если движение направлено именно в эту сторону – это ещё больше повышает риск.

- Проникновение в запретную зону (рис. 3). Пока потенциальный нарушитель ещё не проник в зону, есть вероятность, что он туда и не проникнет: не успеет и его задержит группа реагирования, или он вообще пройдет мимо, или вдруг развернется и уйдет, например, если поймет, что его сейчас поймают и надо уходить. Однако, если он проник в эту зону, это автоматически означает провал группы реагирования, которая не успела или не смогла по каким-либо причинам задержать злоумышленника, отказ замка или какой-либо системы контроля доступа в «запретную» зону, если такая имеется, ну а также отказ всей системы защиты, которая допустила проникновение нарушителя в запретную зону.

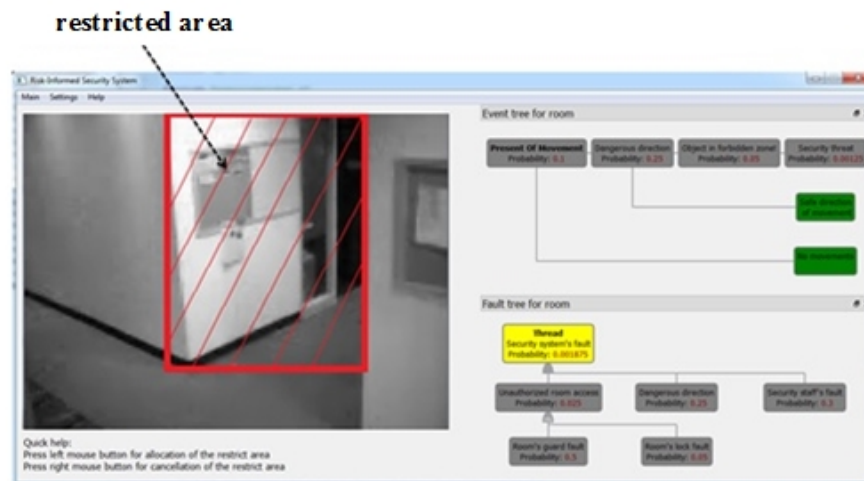


Рис. 1. Окно программы. Помещение (картинка с видеокamеры в реальном времени), «запретная» зона в помещении, дерево событий (сверху) и дерево отказов (снизу)



Рис. 2. Обнаружен нарушитель, движущийся в направлении к запретной зоне

Дерево событий выполняет функции:

- Показывает текущие распознанные события, так или иначе влияющие на уровень безопасности и риска и способные привести к негативному исходу;
- Показывает дальнейшие возможные пути и сценарии развития событий в явном виде на мониторе оператора;
- Выдает численную оценку вероятности исхода тех или иных событий.

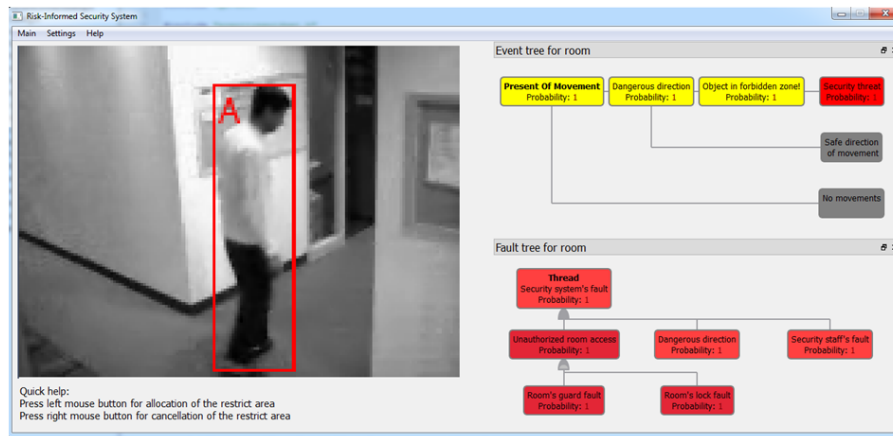


Рис. 3. Нарушитель проник в запретную зону. Отказ СФЗ

Дерево отказов в данном случае выполняет следующие функции:

- показывает, отказ каких именно элементов привёл к тому, что нарушитель оказался в том или ином месте, преодолел тот или иной рубеж безопасности;
- показывает влияние произошедшего отказа на всю систему в целом, в явном виде показывает последствия, как возможные, так и произошедшие. Дело в том, что современные системы защиты строились на принципе единичного отказа – предполагалось, что при отказе одного из компонентов системы вся система способна обеспечить требуемый уровень защищенности. Однако, это далеко не всегда так, в сложных системах отказ одних элементов может явно или неявно влиять на работу других, повышая вероятность их отказа, а значит, и текущий уровень риска. Данная программа явно это показывает на мониторе оператора, выдавая звуковое оповещение;
- при наличии соответствующих инструкций, выдает предупреждение о необходимости включить резервные элементы СФЗ, отправить группу реагирования для проверки ситуации и, при необходимости, задержания нарушителя, предсказывает возможные отказы элементов, зависящих как-либо от уже отказавших и т.д.

Оценить масштаб вторжения можно производить по следующей методике.

Оценка масштаба вторжения характеризуется временем нахождения нарушителей в зоне контроля телекамерами, их тактикой преодоления этой зоны, временем суток, освещенностью и т.д. В зависимости от этих данных можно подбирать наиболее близкие из имеющихся в базе сценариев действий нарушителя, полученных на этапе анализа эффективности и моделирования, и предсказывать наиболее вероятные действия нарушителя, наиболее вероятные маршруты и цели, и, как следствие, быстро организовывать адекватные контрмеры.

Время нахождения нарушителя в зоне контроля телекамерой СОТ определяется как частное от деления длины контролируемой зоны на скорость движения нарушителя:

$$t_{\text{нар}} = \frac{2 \cdot D \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{V_{\text{нар}}} \quad (3)$$

где:

D – расстояние от телекамеры до точки пересечения траектории нарушителя с главной оптической осью камеры (м);

α – угол обзора телекамеры (град);

$V_{\text{нар}}$ – скорость движения нарушителя (м/с).

Для телевизионных камер, контролирующих периметр объекта, принимается, что нарушителя двигается перпендикулярно главной оптической оси камеры.

Внедрение в систему модуля, моделирующего действия нарушителя, описанного в предыдущей главе. Использование данного модуля скомбинированного с методикой оценки масштаба вторжения даст оператору информацию о точном местоположении нарушителя, его количестве, а также покажет дальнейшие возможные пути нарушителя, наиболее вероятные цели, наиболее оптимальные точки для развертывания сил реагирования, а также вероятность перехвата в той или иной точке, что позволит спланировать дальнейшие действия в зависимости от обстановки.

2. Результаты

Работа с видеопотоком реализована с помощью открытой библиотеки компьютерного зрения Open CV. Программа выделяет на неподвижном фоне движущиеся объекты, и осуществляет их трекинг (слежение за объектом). Кроме того, программа работает как детектор движения, на случай, если объект как-то маскируется, и явно его выделить не получается. В этом случае, осуществляется слежение за движущимися частями.

Данный прототип показывает возможности использования системы видеонаблюдения за объектом для автоматизации работы оператора: оценка оперативной обстановки, отслеживание уровня безопасности и уровня риска, демонстрации результатов анализа в реальном времени на мониторе оператора, при наличии – вывода соответствующих инструкций и рекомендаций по дальнейшим действиям, в зависимости от обстановки.

Выводы

Дальнейшая разработка данного программного продукта и его интеграция в существующие системы физической защиты предполагает подключение к программе, как минимум, следующих функций:

- подключение к системе обработки информации с других элементов КТСФЗ: датчиков движения, инфракрасных датчиков, других сигнальных элементов.
- интеграция с системой контроля и управления доступом – в т.ч. для отслеживания действий персонала объекта и выявления внутреннего нарушителя, использующего свои полномочия для нарушения работы объекта;

Данная программа также позволяет с высокой степенью надежности (выше, чем у оператора-человека) оценивать масштаб вторжения.

Благодарность

Работа выполнена и опубликована при поддержке РФФИ, гранты 17-07-01475, 19-07-00455 и 20-07-00577.

Список литературы:

1. Обоймов, А.С. Анализ безопасности физической защиты потенциально опасных объектов / М.А. Берберова, Р.Ш. Кальметьев, Р.Т.Исламов, И.А. Кириллов, С.В. Клименко, Д.В.Минаев, А.С. Обоймов, В.П.Петров // MEDIAS-2011: труды Международной научной конференции. – Протвино-Москва: Изд. ИФТИ, 2011 - С. 114-134.
2. M.A. Berberova, A.S. Oboimov, A.Kh. Khakimova, O.V. Zolotarev, «Risk-informed security system. The use of surveillance cameras for the particularly hazardous facilities safety», Graphi Con 2019. The 29th International Conference on Computer Graphics and Vision. Conference Proceedings (2019), в печати

References:

1. Oboymov A.S. Safety Analysis of Physical Protection of Potentially Hazardous Objects / M.A. Berberova, R.Sh. Kalmetev, R.T. Islamov, I.A. Kirillov, S.V. Klimenko, D.V. Minaev, A.S. Oboimov, V.P. Petrov // MEDIAS-2011: proceedings of the International Scientific Conference.- Protvino-Moscow: Ed.ICPT, 2011 - p. 114-134.
2. M.A. Berberova, A.S. Oboimov, A.Kh. Khakimova, O.V. Zolotarev, «Risk-informed security system. The use of surveillance cameras for the particularly hazardous facilities safety», Graphi Con 2019. The 29th International Conference on Computer Graphics and Vision. Conference Proceedings (2019), in print

3. Бартош О.В., Измайлов А.В., Литвиненко Е.И., Туркин В.М. Методы и алгоритмы анализа оперативных действий сил охраны на объектах типа зданий сложной конфигурации // Специальные вопросы атомной науки и техники. Сер. Технические средства охраны. Науч.-техн. сб. - 1978. - Вып. 1 (10). - С. 60-65.
4. Андропова Е. Самое слабое звено системы безопасности. // Журнал «БДИ» №2 (53) - 2004 г.
5. Разработка рекомендаций по проведению риск-информированного анализа уязвимости и оценки эффективности систем физической защиты ядерно-опасных объектов: Отчет о НИР, рег.№ 2142ОТ11 // Международный центр ядерной безопасности - М., 2011. - 61 с.

3. Bartosh O.V., Izmailov A.V., Litvinenko E.I., Turkin V.M. Methods and algorithms for the analysis of operational actions of security forces at objects such as buildings of complex configuration // Special issues of atomic science and technology. Ser. Security equipment. Scientific and technical Sat- 1978. - Vol.1 (10).- p. 60-65.
4. Andronova E. The weakest link in the security system.// Magazine «BDI» No. 2 (53) - 2004.
5. Development of recommendations for conducting a risk-informed vulnerability analysis and evaluating the effectiveness of the physical protection systems of nuclear hazardous facilities: a research report on reg. No. 2142OT11 // International Nuclear Safety Center - M., 2011. - 61 p.

Статья поступила в редколлегию 10.10.19.

Рецензент:

к.т.н., доцент,

Брянский государственный технический университет

Подвесовский А.Г.

Статья принята к публикации 29.10.19.

Сведения об авторах:

Берберова Мария Александровна

к.т.н., научный сотрудник АНО Международный Центр по ядерной безопасности (Москва, Россия), заместитель директора по науке АНО «Научно-исследовательский Центр физико-технической информатики» (Нижний Новгород, Россия)
Тел.: +7 (916) 507-57-99
E-mail: maria.berberova@gmail.com

Обоймов Антон Сергеевич

аспирант, научный сотрудник АНО Международный Центр по ядерной безопасности (Москва, Россия)
Тел.: +7 (916) 553-78-55,
E-mail: anton.oboimov@gmail.com

Федорова Алена Юрьевна

магистрант, кафедра информационных систем в экономике и управлении АНО ВО «Российский новый университет» (Москва, Россия)
Тел.: +7 (985) 748-74-23,
E-mail: aloonka73@mail.ru

Росщупкина Полина Альбертовна

магистрант, кафедра информационных систем в экономике и управлении АНО ВО «Российский новый университет» (Москва, Россия)
Тел.: +7 (909) 623-20-47,
E-mail: kokos.polina@yandex.ru

Белая Александра Андреевна

магистрант, кафедра информационных систем в экономике и управлении АНО ВО «Российский новый университет» (Москва, Россия)
Тел.: +7 (916) 213-72-93,
E-mail: aabelaya@mail.ru

Information about authors:

Berberova Maria Aleksandrovna

Candidate of Technical Sciences, Researcher ANO International Nuclear Safety Center (Moscow, Russia), Deputy Director for Science ANO «Scientific and Research Center for Information in Physics and Technique» (Nizhny Novgorod, Russia)
Tel.: +7 (916) 507-57-99
E-mail: maria.berberova@gmail.com

Oboimov Anton Sergeevich

Graduate student, Researcher ANO International Nuclear Safety Center (Moscow, Russia)
Tel.: +7 (916) 553-78-55,
E-mail: anton.oboimov@gmail.com

Fedorova Alena Yurievna

Master student, Department of Information Systems in Economics and Management ANO HE «Russian New University» (Moscow, Russia)
Tel.: +7 (985) 748-74-23,
E-mail: aloonka73@mail.ru

Rosshchupkina Polina Albertovna

Master student, Department of Information Systems in Economics and Management ANO HE «Russian New University» (Moscow, Russia)
Tel.: +7 (909) 623-20-47,
E-mail: kokos.polina@yandex.ru

Belaya Aleksandra Andreevna

Master student, Department of Information Systems in Economics and Management ANO HE «Russian New University» (Moscow, Russia)
Tel.: +7 (916) 213-72-93,
E-mail: aabelaya@mail.ru

УДК: 621.039.58

DOI: 10.30987/2658-3488-2019-2019-4-25-32

М.А. Берберова, А.В. Дмитриев, А.В. Голубков,
А.И. Елизаров, Д.Х. Мирзоев, Е.С. Кривошлыкова

ВЕРОЯТНОСТНЫЕ МОДЕЛИ ОТКАЗОВ И ВОССТАНОВЛЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ

Атомные станции (АС) вследствие накопления в процессе эксплуатации значительных количеств радиоактивных продуктов и наличия принципиальной возможности выхода их при авариях за предусмотренные границы представляют собой источник потенциальной опасности или источник риска радиационного воздействия на персонал, население и окружающую среду. Степень радиационного риска прямо зависит от уровня безопасности АС, которая является одним из основных свойств АС, определяющих возможность их использования в качестве источников тепловой и электрической энергии.

Ключевые слова: вероятностный анализ безопасности, вероятностные модели отказов, вероятностные модели восстановлений.

M.A. Berberova, A.V. Dmitriev, A.V. Golubkov,
A.I. Elizarov, D.Kh. Mirzoev, E.S. Krivoshlykova

PROBABILISTIC MODELS FOR FAILURES AND RECOVERIES USED FOR THE PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS EXECUTION

Nuclear power plants (NPPs) due to the accumulation during operation of significant quantities of radioactive products and the availability of the principle possibility of over coming the min accidents beyond the specified limits are a source of potential danger or a source of risk of radiation exposure to personnel, the public and the environment. The degree of radiation risk directly depends on the safety level of the nuclear powerplant, which is one of the main properties of nuclear powerplants that determine the possibility of their use as sources of thermal and electric energy.

Keywords: probabilistic safety analysis, probabilistic failure models, probabilistic recovery models.

Введение

В соответствии с [1] понятие (или термин) «Безопасность АС» определено как «свойство АС при нормальной эксплуатации и нарушениях нормальной эксплуатации, включая аварии, ограничивать радиационное воздействие на персонал, население и окружающую среду установленными пределами».

В соответствии с «[1] понятие безопасности объектов определено как «состояние, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений». В свою очередь понятие риска в этом Законе определяется как «вероятность причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений с учетом тяжести этого вреда».

По отношению к АС причинение вреда связано с радиационным воздействием. Поэтому приведенные в [1] определения понятия безопасности можно считать эквивалентными.

На большинстве эксплуатируемых в настоящее время АС используются реакторы водоводяного типа (ВВЭР). Как показывает мировой опыт, АС с такими реакторами представляют собой источники энергии, удовлетворяющие самым жестким экологическим требованиям в условиях их нормальной эксплуатации. Потенциальная опасность возникает

при авариях, в процессе которых накопленные в тепловыделяющих элементах (ТВЭЛ) и теплоносителе 1-го контура радиоактивные продукты могут выходить за предусмотренные границы в количествах, превышающих установленные для нормальной эксплуатации пределы.

Аварии относятся к категории случайных событий, которые характеризуются размерами последствий и величинами вероятностей их реализации. Понятие аварии составляет фундаментальную основу безопасности, как внутреннего свойства АС, и определяет вероятностную природу этого свойства.

Следует отметить, что вероятностная природа безопасности заключена уже в приведенных выше определениях этого свойства.

1. Независимые отказы оборудования

Для определения неготовности первичных событий при разработке вероятностной модели ВАБ в программе используются вероятностные модели надежности элементов следующих типов:

- постоянно контролируемый, восстанавливаемый элемент (тип 1),
- периодически проверяемый элемент (тип 2),
- элемент с постоянной во времени неготовностью, характеризующийся отказом на требование (тип 3),
- элемент с фиксированным временем работы (тип 4),
- событие, характеризующееся постоянной частотой (тип 5),
- невосстанавливаемый элемент (тип 6).

В таблице 1 приводятся параметры, используемые, как исходные данные, и соответствующие им параметры формул, используемых для расчета неготовности элементов.

Таблица 1. Параметры, используемые, как исходные данные, и соответствующие им параметры формул, используемых для расчета неготовности элементов

Параметры формул	Описание
Q	Вероятность отказа на требование
λ	Интенсивность отказов
F	Частота
W	Параметр потока отказов
μ	Параметр потока (частота) восстановлений
TR	Среднее время восстановления
TI	Интервал между испытаниями элемента
TF	Время первой проверки
TM	Время работы

Для расчета неготовности элемента любого типа необходим один или более требуемых параметров. Для более гибкого моделирования различных отказов некоторые вероятностные модели надежности элементов используют дополнительно один или более необязательные параметры.

1.1. Постоянно контролируемый, восстанавливаемый элемент (тип 1)

Модель предполагает экспоненциальное распределение, как для интенсивности отказов, так и для восстановления, т.е. интенсивность отказов и время восстановления являются константами. Неготовность $Q(t)$ элемента такого типа рассчитывается по формуле

$$Q(t) = qe^{-\mu \cdot t} + \left(\frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right) (1 - e^{-(\lambda + \mu)t}) \quad (1)$$

Требуемые параметры: $\lambda, \mu(r, TR)$.

Необязательные параметры: q .

Второе слагаемое в этой формуле используется в большинстве аналогичных программ. В нулевой момент времени неготовность в этом случае равна 0, а затем быстро возрастает до своего предельного значения.

Первое слагаемое является необязательным и в большинстве случаев не используется. Если $q > 0$, то неготовность имеет постоянную составляющую, и в нулевой момент времени имеет значение q , а затем понижается асимптотически до 0 со скоростью μ .

Среднее значение неготовности (при $t \rightarrow \infty$) элемента типа 1 вычисляется по формуле

$$Q_{mean} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (2)$$

Частота $W(t)$ для элементов типа 1 вычисляется по формуле

$$W(t) = \lambda \cdot (1 - Q(t)) \quad (3)$$

При низкой неготовности частота приблизительно равна интенсивности отказов.

1.2. Периодически проверяемый элемент (тип 2)

Требуемые параметры: $\lambda, TI(r, TI), \lambda, TI(r, TI)$.

Необязательные параметры: q, TR, TF .

Модель предполагает экспоненциальное распределение наработок между отказами (постоянное значение интенсивности отказов), а также постоянные значения тестового интервала и времени восстановления.

Требуемые параметры характеризуют традиционную модель периодически контролируемого элемента. Для такой модели неготовность $Q(t)$ элемента такого типа рассчитывается по формуле

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda(t-T_i)}, \quad T_i = 0, TI, 2TI, \dots \quad (4)$$

Функция неготовности в этом случае отображается пилообразной кривой.

Если задано время первой проверки $TF > 0$, то неготовность будет рассчитываться так же по формуле (4), но моменты проведения проверок будут иметь другие значения: $T_i = 0, TF, TF + TI, TF + 2TI, \dots$

Среднее значение неготовности элемента типа 2 получается интегрированием $Q(t)$ по отрезку времени равному тестовому интервалу

$$Q_{mean} = \frac{1}{TI} \int_0^{TI} Q(t) dt = 1 - \frac{1}{\lambda \cdot TI} (1 - e^{-\lambda TI}) \quad (5)$$

Такая модель справедлива, если время восстановления незначительно (или $TR=0$). Если же это не так, то следует учитывать время восстановления (необязательный параметр TR).

В программе приняты следующие допущения:

- восстановление предпринимается сразу после проведения теста,
- восстановление происходит за фиксированное время TR .

Неготовность элемента типа 2 с учетом восстановления вычисляется по формулам

$$\begin{aligned} Q(t) &= 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{для } t < TF, \\ Q(t) &= Q(TI) = 1 - e^{-\lambda TI} \quad \text{для } t = TF + nTI, \quad n = 1, 2, 3, \end{aligned} \quad \dots(6)$$

$$Q(t) = Q(TI) + (1 - Q(TI)) \cdot (1 - e^{-\lambda(t-TI)}) \quad \text{для } TI < t < TI + TR,$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda(t-TI)} \quad \text{для } TI + TR < t < 2TI.$$

Средняя неготовность с учетом восстановления вычисляется по формуле

$$Q_{mean} = 1 - \frac{1}{\lambda \cdot TI} (1 - e^{-\lambda TI}) + (1 - e^{-\lambda TI}) \cdot \frac{TR}{TI}. \quad (7)$$

Неготовность может также учитывать и постоянную составляющую q , представляющую собой вероятность отказов типа на требование (необязательный параметр). Эта величина не зависит от проверок. В этом случае формулы расчета неготовности будут иметь вид

$$Q(t) = q + 1 - e^{-\lambda t} \quad \text{для } t < TF,$$

$$Q(t) = Q(TI) = q + 1 - e^{-\lambda TI} \quad \text{для } t = TF + nTI,$$

$$Q(t) = Q(TI) + (1 - Q(TI)) \cdot (q + 1 - e^{-\lambda(t-TI)}) \quad \text{для } TI < t < TI + TR,$$

$$Q(t) = q = 1 - e^{-\lambda(t-TI)} \quad \text{для } TI + TR < t < 2TI, \quad (8)$$

$$Q_{mean} = q + 1 - \frac{1}{\lambda \cdot TI} (1 - e^{-\lambda TI}) + (q + 1 - e^{-\lambda TI}) \cdot \frac{TR}{TI} \quad (9)$$

Частота в этом случае вычисляется по обычной формуле

$$W(t) = \lambda \cdot (1 - Q(t)). \quad (10)$$

1.3. Постоянная во времени неготовность, отказ на требование (тип 3)

Это самая простая и очень часто используемая модель, использующая единственный параметр q - вероятность отказа на требование.

В этом случае используются формулы

$$Q(t) = q$$

$$Q_{mean} = q$$

$$W(t) = 0. \quad (11)$$

1.4. Элемент с фиксированным временем работы (тип 4)

Неготовность в этом случае, так же как и для типа 3 является постоянной величиной. Однако ее значение не задается в исходных данных, а рассчитывается по заданным значениям интенсивности отказов и времени работы. Кроме того, неготовность может иметь и составляющую q - вероятность отказов типа на требование.

Требуемые параметры: λ , ТМ.

Необязательный параметр: q .

Используются следующие формулы

$$Q(t) = q + 1 - e^{-\lambda \cdot TM}$$

$$Q_{mean} = q + 1 - e^{-\lambda TM}$$

$$W(t) = 0. \quad (12)$$

1.5. Постоянная частота (тип 5)

Эта модель используется, когда событие хорошо описывается пуассоновским

процессом, т.е. когда события возникают с постоянной частотой. В этом случае необходим единственный параметр f .

$$Q(t) = 0$$

$$Q_{mean} = 0$$

$$W(t) = f.$$

(13)

Модель используется только для исходных событий, которые включаются в разрабатываемые деревья событий (рис. 1), а также могут использоваться в деревьях отказов (рис. 2).

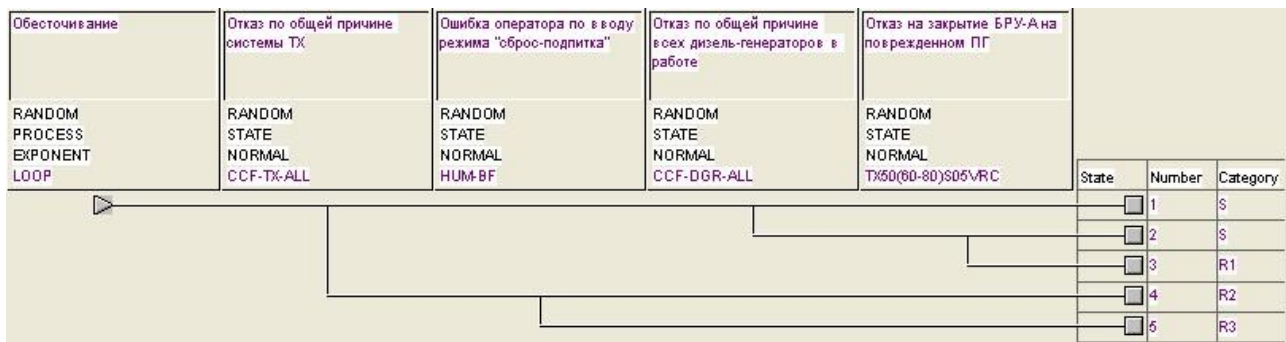


Рис. 1. Пример разрабатываемого дерева событий

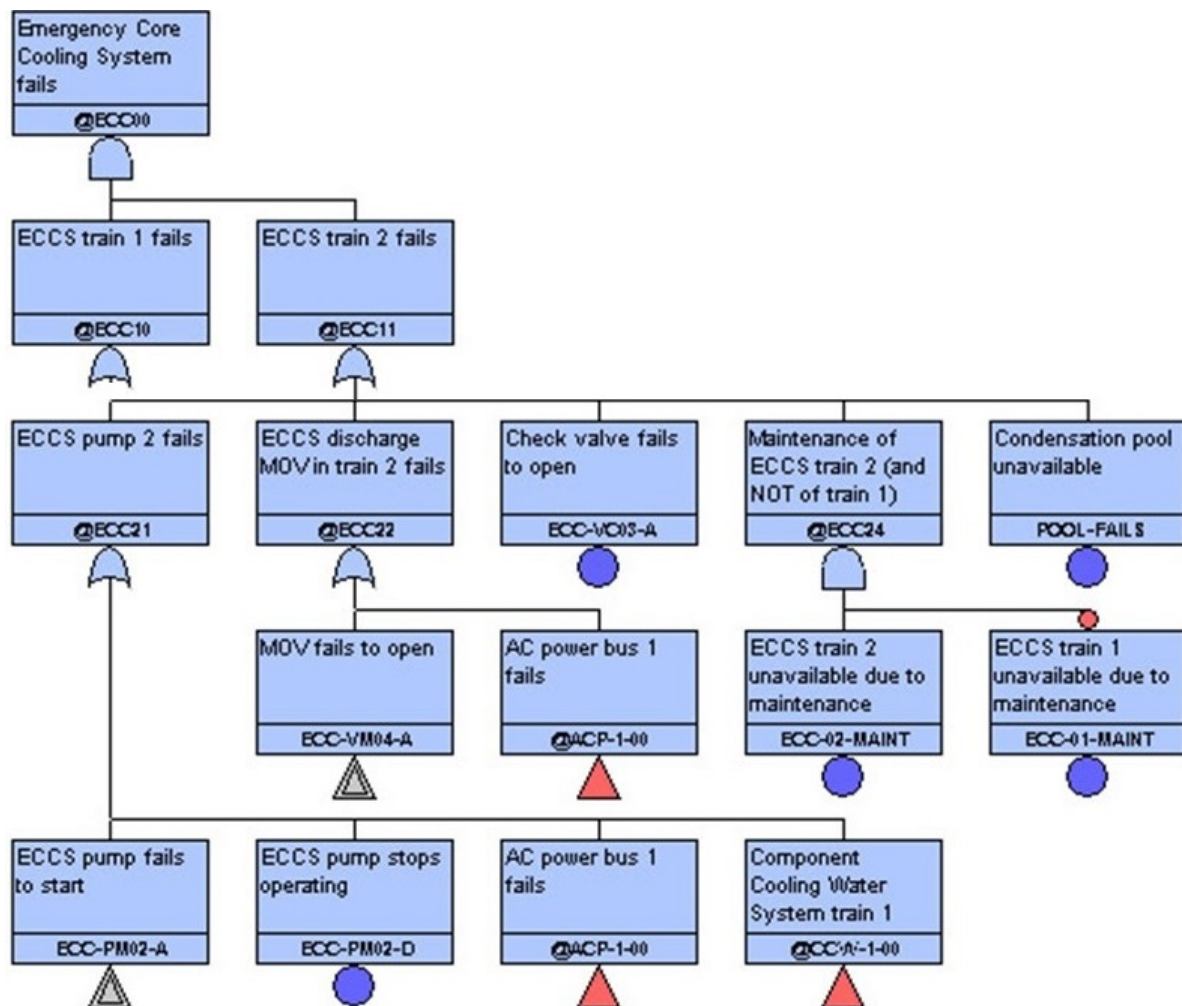


Рис. 2. Пример дерева отказов

1.6. Невосстанавливаемый элемент (тип 6)

Это традиционная модель восстанавливаемых элементов с постоянной интенсивностью отказов. Так же как и для других моделей, здесь можно использовать как постоянную составляющую q - вероятность отказа на требования независимую от времени. В этом случае неготовность элемента в нулевой момент времени будет равна q .

Требуемый параметр: λ (г).

Необязательный параметр: q .

$$Q(t) = q + 1 - e^{-\lambda t}$$

$$W(t) = \lambda \cdot (1 - Q(t)). \quad (14)$$

2. Отказы общего вида

Единственной исходной информацией, хранящейся в базе данных проекта являются базовые события, сгруппированные по признаку потенциально возможного ООВ и параметры модели учёта ООВ, используемые в расчетах.

При расчете используется три параметрические модели учёта отказов по общим причинам: бета фактор, греческие буквы, альфа факторы.

Работа с группами ООВ может быть легко «прослежена» разработчиком модели. После определения группы определяются все возможные события комбинаций отказов по общим причинам и разрабатывает для каждого независимого отказа дополнительное дерево отказов по общим причинам. В этом дереве отказов логическим оператором OR (“или”) первичное событие независимого отказа объединяется со всеми возможными событиями комбинаций ООВ. И дополнительные события ООВ, и деревья отказов ООВ программа автоматически вводит в базу данных проекта, к которой имеется доступ для разработчика. Таким образом, разработчик модели может просмотреть логику деревьев отказов ООВ и численных значений параметров надежности отдельных дополнительных событий ООВ.

Три модели и соответствующие параметры, используемые для моделирования отказов по общим причинам приведены в таблице 2.

Таблица 2. Три модели и соответствующие параметры, используемые для моделирования отказов по общим причинам

Модель отказов по общим причинам	Параметры
Модель бета-фактора	Бета, ®
Модель греческих букв	Бета, ® Гамма, ® Дельта, тм
Модель альфа-фактора	Альфа 2, ₂ Альфа 3, ₃ Альфа 4, ₄

Формулы, по которым определяются показатели неготовности для событий отказов по общим причинам (таблица 3), используют следующие обозначения:

Q_{tot} - Суммарная неготовность каждого первичного события группы отказов, обусловленная независимыми отказами и отказами по общим причинам, рассчитанная программой на основе заданных параметров используемой модели надежности и модели отказов по общим причинам.

Q_k - Неготовность для событий отказов по общим причинам порядка k , т.е. для группы k первичных событий, включенных в одну группу отказов по общей причине.

N - Количество первичных событий, включенных в одну группу отказов по общей причине.

Таблица 3. Формулы, по которым определяются показатели неготовности для событий отказов по общим причинам

Модель бета-фактора	Модель греческих букв	Модель альфа-фактора
<u>Обобщенные формулы</u>		
$Q_k = (1 - \beta) \cdot Q_{tot}, k=1$ $Q_k = 0, 1 < k < N$ $Q_k = \beta \cdot Q_{tot}, k = N$	$Q_k = \frac{1}{C_{N-1}^{k-1}} \cdot \left(\prod_{i=1}^k \rho_i \right) \cdot (1 - \rho_{k+1}) \cdot Q_{tot}$ $\rho_1 = 1, \rho_2 = \beta, \rho_3 = \gamma, \dots, \rho_{N+1} = 0,$	$Q_k = \frac{k}{C_{N-1}^{k-1}} \cdot \frac{\alpha_k}{\alpha_{tot}} \cdot Q_{tot}$ $\alpha_{tot} = \sum_{k=1}^N k \alpha_k, \sum_{k=1}^N \alpha_k = 1$
<u>Формулы для четырехэлементных групп отказов по общим причинам</u>		
$Q_1 = (1 - \beta) \cdot Q_{tot}$ $Q_2 = 0$ $Q_3 = 0$ $Q_4 = \beta \cdot Q_{tot}$	$Q_1 = (1 - \beta) \cdot Q_{tot}$ $Q_2 = \frac{1}{3} \beta \cdot (1 - \gamma) \cdot Q_{tot}$ $Q_3 = \frac{1}{3} \beta \gamma \cdot (1 - \delta) \cdot Q_{tot}$ $Q_4 = \beta \gamma \delta \cdot Q_{tot}$	$Q_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_{tot}} \cdot Q_{tot}$ $Q_2 = \frac{2}{3} \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_{tot}} \cdot Q_{tot}$ $Q_3 = \frac{\alpha_3}{\alpha_{tot}} \cdot Q_{tot}$ $Q_4 = 4 \cdot \frac{\alpha_4}{\alpha_{tot}} \cdot Q_{tot}$

Формулы, по которым определяются параметры потока отказов, аналогичны формулам для расчета неготовности. При этом Q_{tot} в формулах заменяется на W_{tot} - суммарный параметр потока отказов каждого первичного события группы отказов, обусловленный независимыми отказами и отказами по общим причинам и рассчитанный программой на основе заданных параметров используемой модели надежности и модели отказов по общим причинам.

Здесь следует отметить, что величина Q_{tot} (W_{tot}) по своему смыслу аналогична показателю неготовности (параметру потока отказов) рассчитанному для одного первичного события в группе отказов по общей причине. Отказы по общей причине рассматриваются как разные виды отказов каждого отдельного элемента оборудования, а их вероятность является частью полной вероятности отказа компонента. Т.е. вклад отказов по общей причине не добавляется к обычной неготовности первичного события. Такой подход полностью соответствует определению моделей отказов по общим причинам и практике анализа данных по таким отказам.

Благодарности

Работа выполнена и опубликована при поддержке РФФИ, гранты РФФИ 17-07-01475, 19-07-00455 и 20-07-00577.

Список литературы:

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности атомных станций» (НП-001-15): [Нормы и правила НП-001-15: утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. № 522]. - М., 2015. - 74 с.
2. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 10.07.01

References:

1. Federal norms and rules in the field of atomic energy use "General provisions for ensuring the safety of nuclear plants" (NP-001-15): [Norms and rules of NP-001-15: approved by order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision of December 17, 2015No. 522]. - M., 2015. - 74 p.
2. RD 03-418-01.Guidelines for conducting risk analysis of hazardous production facilities.Approved by the resolution of the Gosgortekhnadzor of Russia dated July 10, 2001 No. 30. Enteredin to force on September 01, 01.

№ 30. Введены в действие с 01.09.01.

3. NUREG/CR-2300, «PRA Procedures Guide», US NRC, January 1983.
4. NUREG/CR-2815, «Probabilistic Safety Analysis Procedures Guide», US NRC, August 1985.
5. NUREG/CR-4550. Analysis of Core Damage Frequency from Internal Events: Methodology Guidelines. Volume 1. US NRC, September 1987.
6. M.A. Berberova, A.V. Dmitriev, A.V. Golubkov, A.I. Elizarov, «Calculation of the probabilistic safety analysis and reliability by the fault trees and event trees methods», GraphiCon 2019. The 29th International Conference on Computer Graphics and Vision. Conference Proceedings (2019), в печати.

3. NUREG/CR-2300, «PRA Procedures Guide», US NRC, January 1983.
4. NUREG/CR-2815, «Probabilistic Safety Analysis Procedures Guide», US NRC, August 1985.
5. NUREG/CR-4550. Analysis of Core Damage Frequency from Internal Events: Methodology Guidelines. Volume 1. US NRC, September 1987.
6. M.A. Berberova, A.V. Dmitriev, A.V. Golubkov, A.I. Elizarov, «Calculation of the probabilistic safety analysis and reliability by the fault trees and event trees methods», GraphiCon 2019. The 29th International Conference on Computer Graphics and Vision. Conference Proceedings (2019), in print.

Статья поступила в редколлегию 17.10.19.

Рецензент: к.т.н., доцент,

Брянский государственный технический университет Подвесовский А.Г.

Статья принята к публикации 16.11.19.

Сведения об авторах

Берберова Мария Александровна

к.т.н., научный сотрудник АНО Международный Центр по ядерной безопасности (Москва, Россия), заместитель директора по науке АНО «Научно-исследовательский Центр физико-технической информатики» (Нижний Новгород, Россия)

Тел.: +7 (916) 507-57-99

E-mail: maria.berberova@gmail.com

Дмитриев Александр Валентинович

к.т.н., ведущий научный сотрудник АНО Международный Центр по ядерной безопасности (Москва, Россия)

Тел.: +7 (905) 515-39-07

E-mail: avdv@list.ru

Голубков Александр Валентинович

старший научный сотрудник АНО Международный Центр по ядерной безопасности (Москва, Россия)

Тел.: +7 (903) 104-53-42

E-mail: sgo@mail.ru

Елизаров Александр Игоревич

к.т.н., главный специалист АО «ВНИИАЭС» (Москва, Россия)

Тел.: +7 (916) 536-54-61

E-mail: eiao8lzrv@mail.ru

Мирзоев Далер Халилilloевич

магистрант, кафедра информационных систем в экономике и управлении АНО ВО «Российский новый университет» (Москва, Россия)

Тел.: +7 (925) 644-44-80

E-mail: getvubo@mail.ru

Кривошлыкова Екатерина Станиславовна

магистрант, кафедра информационных систем в экономике и управлении АНО ВО «Российский новый университет» (Москва, Россия)

Тел.: +7 (962) 923-53-17

E-mail: katuxa25.90@mail.ru

Information about authors:

Berberova Maria Aleksandrovna

Candidate of Technical Sciences, Researcher ANO International Nuclear Safety Center (Moscow, Russia), Deputy Director for Science ANO «Scientific and Research Center for Information in Physics and Technique» (Nizhny Novgorod, Russia)

Tel.: +7 (916) 507-57-99

E-mail: maria.berberova@gmail.com

Dmitriev Aleksandr Valentinovich

Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher ANO International Nuclear Safety Center (Moscow, Russia)

Tel.: +7 (905) 515-39-07

E-mail: avdv@list.ru

Golubkov Aleksandr Valentinovich

Senior Researcher ANO International Nuclear Safety Center (Moscow, Russia)

Tel.: +7 (903) 104-53-42

E-mail: sgo@mail.ru

Elizarov Aleksandr Igorevich

Candidate of Technical Sciences, Chief Specialist, VNIIAES JSC (Moscow, Russia)

Tel.: +7 (916) 536-54-61

E-mail: eiao8lzrv@mail.ru

Mirzoev Daler Khalililloevich

Master student, Department of Information Systems in Economics and Management ANO HE «Russian New University» (Moscow, Russia)

Tel.: +7 (925) 644-44-80

E-mail: getvubo@mail.ru

Krivoshlykova Ekaterina Stanislavovna

Master student, Department of Information Systems in Economics and Management ANO HE «Russian New University» (Moscow, Russia)

Tel.: +7 (962) 923-53-17

E-mail: katuxa25.90@mail.ru

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Целью работы является получение аналитического решения уравнения теплопроводности для различных граничных условий в случае двумерного тела. В качестве метода решения применяется метод вариационных итераций. В работе получено как аналитическое, так и численное решение поставленной задачи для граничных условий различных типов и с учётом внутреннего источника тепла. Для получения численного решения применялся метод конечных разностей. Проведено сравнение результатов и сделан вывод о достоверности полученных решений.

Ключевые слова: уравнение теплопроводности, метод вариационных итераций, аналитическое решение, метод конечных разностей.

V.A. Krysko, A.D. Tebyakin, O.A. Saltykova

ANALYTICAL SOLUTION OF THE EQUATION OF CONDUCTIVITY FOR VARIOUS BOUNDARY CONDITIONS

The aim of the work is to obtain an analytical solution of the heat equation for various boundary conditions in the case of a two-dimensional body. As a solution method, the method of variational iterations is used. In the work, both an analytical and a numerical solution of the problem are obtained for the boundary conditions of various types and taking into account the internal heat source. To obtain a numerical solution, the finite difference method was used. The results are compared and the conclusion is made on the reliability of the decisions.

Keywords: heat equation, method of variational iterations, analytical solution, finite difference method.

Введение

При проектировании и создании различных инженерных конструкций и устройств, составными частями которых являются балки, пластинки, оболочки необходимо учитывать влияние окружающей среды и внешних воздействий различной природы, в том числе температурных [1, 2].

Для учета температурных воздействий используется дифференциальное уравнение теплопроводности [3]. При решении дифференциального уравнения в частных производных численными методами необходимо обосновать достоверность получаемого численного решения. В настоящей работе проведено сравнение численного решения уравнения второго порядка в частных производных и аналитического решения. Для получения аналитического решения используется метод вариационных итераций [4]. Этот метод был использован в работах [5, 6] для решения уравнения, описывающего перемещение тонкой прямоугольной пластины. Применяемый метод вариационных итераций обладает рядом преимуществ. Этот метод позволяет свести исходное дифференциальное уравнение в частных производных к решению обыкновенного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами и избавляет от необходимости выбирать начальное приближение, удовлетворяющее заданным

граничным условиям, как в методе Бубнова-Галеркина [7]. Заданные вначале функции, выбранные произвольно, в процессе вычислений уточняются, исходя из решения системы дифференциальных уравнений. Данный подход позволит сравнить решения уравнения теплопроводности, полученные двумя принципиально разными методами: аналитически – методом вариационных итераций и численно – методом конечных разностей.

1. Постановка задачи

Имеется дифференциальное уравнение теплопроводности для двумерного тела.

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = f(x, y) \quad (1)$$

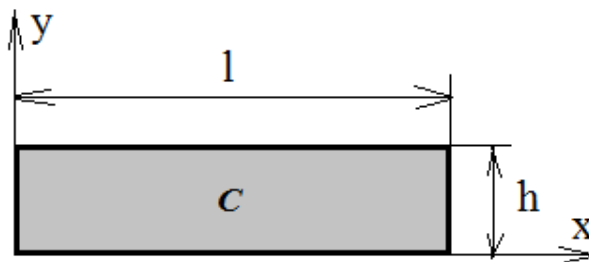


Рис. 1. Расчетная схема двумерного тела

Граничные условия:

$$\begin{aligned} T(x, 0) = 0 \quad 0 \leq x \leq l; \quad T(0, y) = 0 \quad 0 \leq y \leq h; \quad T(l, y) = 0 \quad 0 \leq y \leq h; \\ T(x, h) = 0 \quad 0 \leq x \leq l; \quad f(x, y) = C \neq 0 - \text{const}. \end{aligned} \quad (2)$$

Граничные условия (2) соответствуют случаю, когда на границах присутствует тепловая изоляция и постоянный нагрев по всему телу, величиной C . Этот вариант будет решён аналитически, а так же, в качестве достоверности, найдём решение численным методом.

2. Практическая часть

Найдём решение уравнения (1), в случае, когда учитывается внутренний источник тепла C в виде (3):

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = C. \quad (3)$$

Граничные условия запишем в виде:

$$\begin{aligned} T(x, 0) = 0, \quad 0 \leq x \leq l; \\ T(0, y) = 0, \quad 0 \leq y \leq h; \\ T(l, y) = 0, \quad 0 \leq y \leq h; \\ T(x, h) = 0, \quad 0 \leq x \leq l. \end{aligned} \quad (4)$$

В используемом методе полагается что:

$$T(x, y) = A(x)B(y); \quad (5)$$

$$\int_0^l \int_0^h \left(\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial z^2} - C \right) T(x, y) dx dy = 0. \quad (6)$$

Для нахождения искомого решения полагаем, что $B(y)$ - любая функция, имеющая непрерывную вторую производную и не равную нулю. Тогда:

$$\begin{aligned} \int_0^l \left[\int_0^h \left(\frac{\partial^2 A(x)}{\partial x^2} B(y) + \frac{\partial^2 B(y)}{\partial y^2} A(x) - C \right) B(y) dy \right] A(x) dx &= 0 \Rightarrow \\ \int_0^h \left(\frac{\partial^2 A(x)}{\partial x^2} B(y) + \frac{\partial^2 B(y)}{\partial y^2} A(x) - C \right) B(y) dy &= 0; \\ \frac{\partial^2 A(x)}{\partial x^2} \int_0^h B^2(y) dy + A(x) \int_0^h \frac{\partial^2 B(y)}{\partial y^2} B(y) dy - C \int_0^h B(y) dy &= 0; \\ R_1 = \int_0^h B^2(y) dy > 0; \quad R_2 = \int_0^h \frac{\partial^2 B(y)}{\partial y^2} B(y) dy; \quad R_3 = \int_0^h B(y) dy \end{aligned} \quad (7)$$

Пусть получилось неоднородное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами относительно функции $A(x)$.

$$A''(x) + \frac{R_2}{R_1} A(x) = \frac{R_3}{R_1} C. \quad (8)$$

Решается неоднородное дифференциальное уравнение, находятся корни характеристического уравнения. В зависимости от знака константы R_2 определяется тип решения дифференциального уравнения.

$$\begin{aligned} R_2 > 0 \Rightarrow A(x) &= C_1 \cos \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} x + C_2 \sin \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} x + \frac{R_3}{R_1} C; \\ R_2 < 0 \Rightarrow A(x) &= C_1 e^{x \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}} + C_2 e^{-x \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}} + \frac{R_3}{R_1} C. \end{aligned} \quad (9)$$

Находим константы C_1, C_2 относительно граничных условий (4). Так как константы две, нужно использовать 2 точки на границах двумерного тела. Эти точки должны лежать на одной прямой и быть параллельными оси x .

Аналогичным образом находится функция $B(y)$. В ходе решения $A(x)$ заменяется на $B(y)$ и повторяются те же рассуждения. В итоге мы получаем функцию вида (7). Для уточнения решения проводим вторую итерацию.

Итак, для нахождения функции $T(x, y)$ положим что $B(y) = \sin y$, $l = h = 1$ и внутренний источник тепла $C = 1$. Выполнив первую итерацию, получаем аналитическое решение уравнения (3) вида (10)

$$\begin{aligned} T(x, y) &= (-0.453402e^x - 1.2324745e^{-x} - 1.685877) * \\ &(-0.264576e^{3.166166x} - 0.625940e^{-3.166166x} + 0.652333). \end{aligned} \quad (10)$$

На рисунке 2 приведем поверхность, соответствующую аналитическому решению.

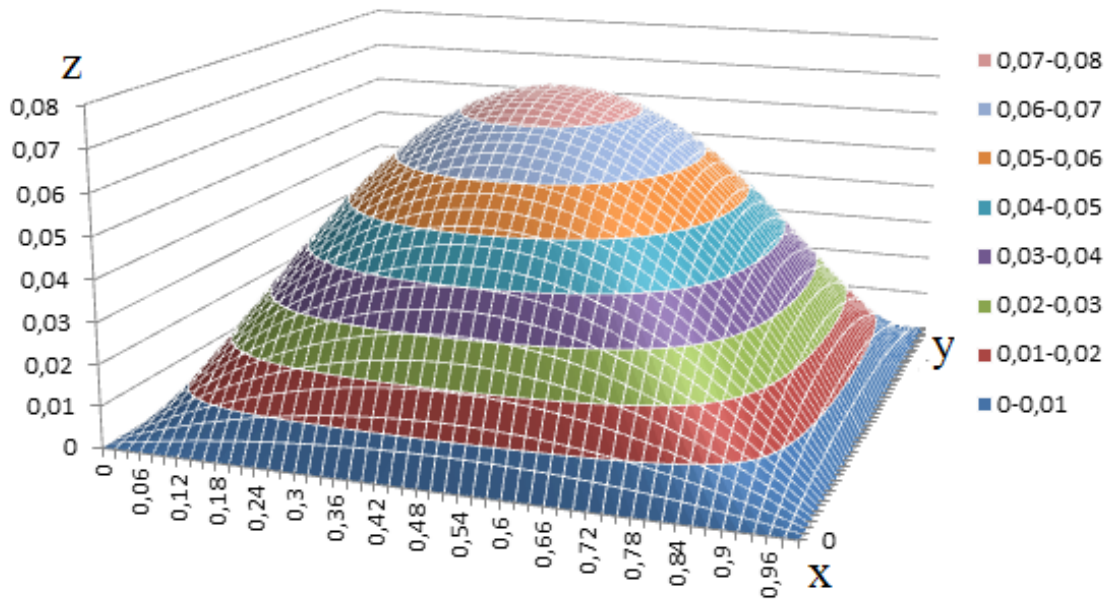


Рис. 2. Аналитическое решение

Для проверки достоверности проведём численное решение уравнения (3) с помощью метода конечных разностей. Решение, полученное методом конечных разностей с аппроксимацией второго порядка, приведено на рисунке 3. Количество разбиений по пространственной координате равно 50.

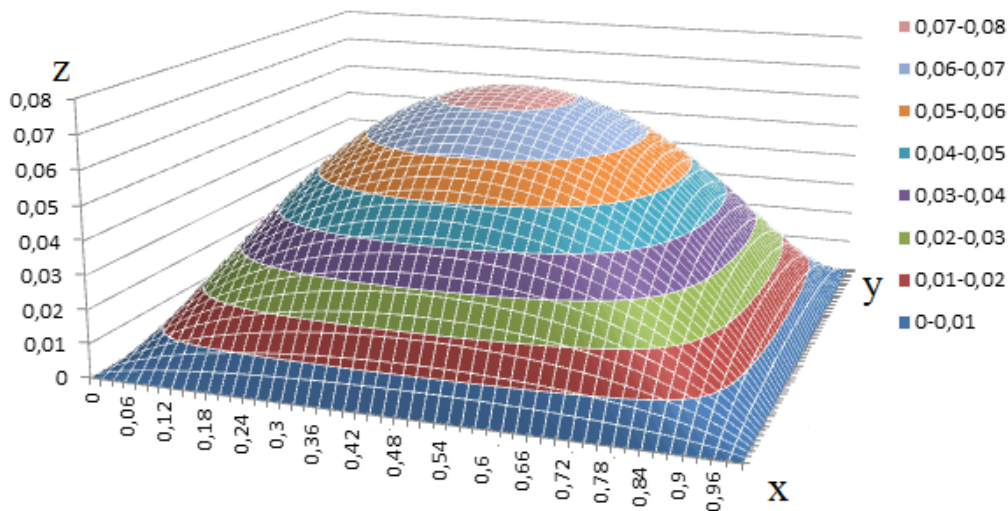


Рис. 3. Численное решение

Максимальное значение аналитического решения составляет 0.07542211, а максимум численного решения 0.07315. Разница между аналитическим и численным решением составляет 0,3 %. Учитывая, что аналитическое решение получено за одну итерацию, можно говорить о точности получаемого численного решения.

Выводы

Совпадение этих двух решений позволяет говорить о достоверности результатов получаемых численными методами и аналитически. При решении уравнения методом вариационных итераций не накладывается каких-либо ограничений на выбор исходной функции. Метод вариационных итераций может быть широко применен для получения аналитических решений дифференциальных уравнений в частных производных.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 16-11-10138-П.

Список литературы:

1. Сметанников, О. Ю. (2010). Оптимизация остаточного прогиба круглой пластинки из стеклующегося полимера при неравномерном охлаждении. *Вычислительная механика сплошных сред*, 3(1), 81-92.
2. Крылова, Е. Ю., Кутепов, И. Е., Папкина, И. В., & Крысько, В. А. (2016). Математическое моделирование контактного взаимодействия пологих геометрически нелинейных балок Бернулли-Эйлера в рамках связанной задачи термодинамики. *Нелинейный мир*, 14(7), 36-46.
3. Добрян, В. В., Кутепов, И. Е., & Крысько, А. В. (2016). Устойчивость гибких криволинейных нанобалок в температурном поле. Молодежь и современные информационные технологии (pp. 96-97).
4. Жигалов, М. В., & Павлов, С. П. (2015). Применение метода вариационных итераций к решению задач изгиба пластин. *Математические методы в технике и технологиях-ММТТ*, (1), 88-91.
5. Krysko A.V., Awrejcewicz J., Pavlov S.P., Zhigalov M.V., Krysko V.A. On the iterative methods of linearization, decrease of order and dimension of the Karman-type PDEs. *The Scientific World Journal Volume 2014 (2014)*, Article ID 792829, 15 pages
6. Kerr, A. D., & Alexander, H. (1968). An application of the extended Kantorovich method to the stress analysis of a clamped rectangular plate. *Acta Mechanica*, 6(2-3), 180-196.
7. Хуршудян, А. Ж. (2015). Метод Бубнова-Галеркина в задачах управления билинейными системами. *Автоматика и телемеханика*, (8), 46-55.

References:

1. Smetannikov, O. Yu. (2010). Optimization of the residual deflection of a glass plate of a glassy polymer during uneven cooling. *Computational mechanics of continuous media*, 3 (1), 81-92.
2. Krylova, E. Yu., Kutepov, I.E., Pap-kova, I.V. & Krysko, V.A. (2016). Mathematical modeling of the contact interaction of gentle geometrically nonlinear Bernoulli-Euler beams as part of the related problem of thermodynamics. *Nonlinear World*, 14 (7), 36-46.
3. Dobriyan, V.V., Kutepov, I.E. & Krysko, A.V. (2016). Stability of flexible curved nano-beams in a temperature field. *Youth and modern information technologies* (pp. 96-97).
4. Zhigalov, M.V., & Pavlov, S.P. (2015). Application of the method of variational iterations to the solution of problems of plate bending. *Mathematical methods in engineering and technology-MMTT*, (1), 88-91.
5. Krysko A.V., Awrejcewicz J., Pavlov S.P., Zhigalov M.V., Krysko V.A. On the iterative methods of linearization, decrease of order and dimension of the Karman-type PDEs. *The Scientific World Journal Volume 2014 (2014)*, Article ID 792829, 15 pages
6. Kerr, A. D., & Alexander, H. (1968). An application of the extended Kantorovich method to the stress analysis of a clamped rectangular plate. *Acta Mechanica*, 6 (2-3), 180-196.
7. Khurshudyan, A. Zh. (2015). The Bubnov – Galerkin method in control problems of bilinear systems. *Automation and Telemechanics*, (8), 46-55.

Статья поступила в редколлегию 22.10.19.

Рецензент: д.т.н., доцент,

Брянский государственный технический университет

Захарова А.А.

Статья принята к публикации 14.11.19.

Сведения об авторах

Крысько Вадим Анатольевич

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Математика и моделирование» Саратовский государственный технический университет Гагарина Ю.А.

Тел.: +79372250227

E-mail: tak@san.ru

Салтыкова Ольга Александровна

к.ф.-м.н., доцент каф. «Математика и моделирование» Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Тел.: +79379610455

E-mail: olga_a_saltykova@mail.ru

Тебякин Алексей Дмитриевич

Магистр каф. «Математика и моделирование» Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Тел.: +79518857199

E-mail: prototype9235@mail.ru

Information about authors:

Krysko Vadim Anatolyevich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department "Mathematics and Modeling" Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Tel.: +79372250227

E-mail: tak@san.ru

Saltykova Olga Alexandrovna

Ph.D., Associate Professor "Mathematics and Modeling" Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Tel ...: +7 9379610455

E-mail: olga_a_saltykova@mail.ru

Tebyakin Alexey Dmitrievich

Masters Dept. "Mathematics and Modeling" Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Tel ...: +79518857199

E-mail: prototype9235@mail.ru

УДК: 004.8

DOI: 10.30987/2658-3488-2019-2019-4-38-43

М.С. Любимов, В.И. Лушков, А.А. Азарченков

РАСПОЗНАВАНИЕ ОБЪЕКТОВ ДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ С ПОМОЩЬЮ ПОЛНОСВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

В данной статье представлен метод распознавания ключевых объектов дорожной инфраструктуры с использованием полносверточной нейронной сети. Результатом работы нейронной сети является сегментированное изображение, где искомые объекты выделены определенными цветами. На этапе постобработки происходит выделение участка дорожного полотна, по которому передвигается машина, а также вычисление параметров ограничивающих прямоугольников, для каждого из объектов. Данный метод позволяет локализовать дорогу, пешеходный переход, автомобили, дорожные знаки, светофоры, пешеходов. Тестирование разработанного алгоритма производилось на макете городской инфраструктуры в масштабе 1:18, где в качестве автомобиля выступал колесный робот.

Ключевые слова: полносверточная нейронная сеть, локализация объектов, сегментирование изображения, Pyramid Scene Parsing Network, колесный робот.

M.S. Lubimov, V.I. Lushkov, A.A. Azarchenkov

OBJECT RECOGNITION OF ROAD INFRASTRUCTURE USING A FULLY CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORK

This article presents a method for recognizing key objects of the road infrastructure using a fully convolutional neural network. The result of the neural network is a segmented image, where the desired objects are highlighted in certain colors. At the post-processing stage, a section of the roadway along which the car moves is selected, as well as the calculation of the parameters of the bounding rectangles for each of the objects. This method allows you to localize the road, pedestrian crossing, cars, traffic signs, traffic lights, pedestrians. Testing of the developed algorithm was carried out on a model of the urban infrastructure at a scale of 1:18, where a wheeled robot acted as a car.

Keywords: fully convolutional neural network, object localization, image segmentation, Pyramid Scene Parsing Network, wheeled robot.

Введение

В настоящее время ведутся активные разработки в области беспилотных транспортных средств. Некоторые компании приближаются к последнему, пятому уровню автономности, при котором становится возможным полностью автономное движение автомобиля без участия водителя. Одной из ключевых задач, без которых невозможно создание беспилотного средства в динамической среде является задача распознавания объектов дорожной сети. Существуют различные подходы для решения этой задачи: от распознавания отдельных элементов, таких как дорожные знаки или светофоры [7], до более комплексных подходов [8], позволяющих детектировать несколько элементов. Распознавание может производиться на основе информации, приходящей от разных сенсоров. Наиболее сенсорами являются камеры, возвращающие изображения и лидары, возвращающие облако точек. Использование камер является более традиционным методом, который имитирует зрение водителя. В области компьютерного зрения распознавание объектов является одной из основных задач, для решения которой используют как стандартные алгоритмы компьютерного зрения [4], так и использования различных архитектур нейронных систем [1]. Метод, описанный в данной статье, основан на использовании полносверточной нейронной сети [6], выполняющей задачу сегментации изображения.

Говоря о разработке беспилотного транспортного средства отдельное внимание следует уделить этапу тестирования алгоритмов. Тестирование на реальных автомобилях может

повлечь как человеческие, так и финансовые жертвы. Поэтому одним из вариантов решения этой задачи может служить использование модели в уменьшенном масштабе, сохраняющей основные свойства реального движения. Еще одно преимущество использования макета заключается в том, что он позволяет приобретать навык людям, желающим развиваться в области беспилотных транспортных средств, без серьезных последствий. Разработанная система распознавание объектов была протестирована на макете, содержащем несколько видов светофоров, дорожные знаки, пешеходов, автомобили, дорожное полотно с разметкой.

1. Распознавание объектов

Основой детектирования объектов является полносверточная нейронная сеть, которая принимает на вход изображение с камеры и возвращает сегментированное изображение (рис. 1). Сегментирование – это процесс, при котором генерируется изображение, содержащее однородные области одинакового цвета, где каждому цвету соответствует определенный объект. Определение объектов на основе сегментированного изображения позволяет решить несколько задач, необходимых для беспилотного движения автомобиля: с одной стороны, она позволяет детектировать объекты дорожной сети, с другой решается задача распознавания дорожного полотна.

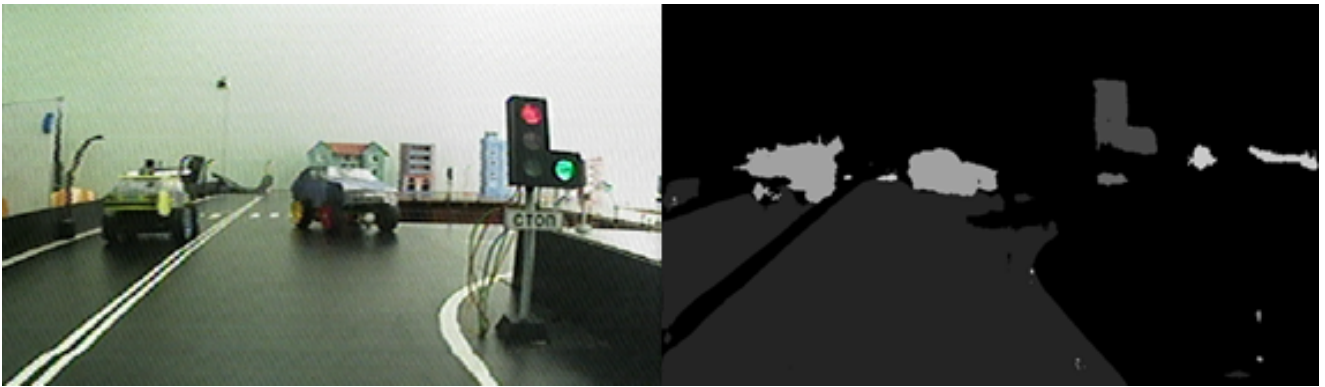


Рис. 1. Пример сегментированного изображения

Используемая нейронная сеть базируется на архитектуре Pyramid Scene Parsing Network [3]. Основными компонентами сети являются предобученная сеть Residual Network (Resnet) [5] и Pyramid Pooling Module.

Модель Resnet является сверточной моделью, отличительной особенностью которой является, наличие остаточной структуры обучения позволяет увеличивать глубину сети без потерь точности. На выходе сверточной сети генерируется карта признаков (feature map), которая поступает на слой подвыборки (pooling layer), данная часть сети называется пирамидальной подвыборкой (Pyramid Pooling Module) потому что состоит из нескольких уровней (рис 2.):

- красный: это самый крупный уровень, который выполняет глобальную подвыборку для каждой карты признаков, в результате чего генерируется одно значение на выходе;
- оранжевый: это второй уровень, который делит карту признаков на 2×2 субрегиона, а затем выполняет среднее объединение для каждого субрегиона;
- синий: это третий уровень, который делит карту объектов на 3×3 субрегиона, а затем выполняет среднее объединение для каждого субрегиона;
- зеленый: это уровень, который делит карту объектов на 6×6 субрегионов, а затем выполняет объединение для каждого субрегиона.

Затем происходит операции увеличения размерности слоев (Upsample), и их объединение.

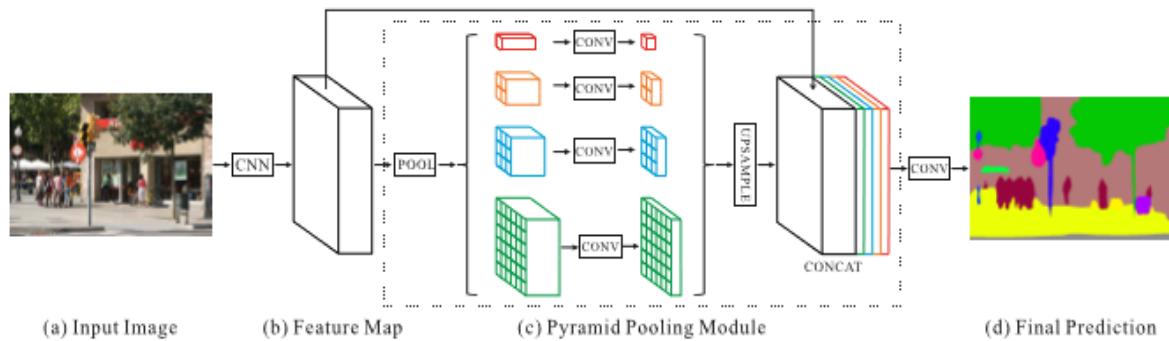


Рис. 2. Pyramid Science Network

2. Обучение

Для обучения нейронной сети был подготовлен собственный набор данных, содержащий макет, по которому передвигался колесный робот. Для каждого изображения вручную выполнялось заполнение областей, принадлежавших разным объектам. Было подготовлено более 1000 кадров, для обучения нейронной сети.

Важным этапом обучения нейронной сети является аугментация данных. Аугментация – это процесс, позволяющий расширить существующий датасет за счет применения методов обработки изображения. Важно, что аугментация данных должна так, чтобы измененные изображения не имели значительного отклонения от потенциально возможных при использовании нейронной сети. В разрабатываемой статье использовались следующие методы:

- изменение яркости изображения;
- изменение экспозиции изображения;
- отражение части изображений по горизонтали;
- добавление шумов на изображение.

Необходимость последнего пункта обоснована тем, что при тестировании алгоритма, на изображении было замечено появление шумов, связанных со способом передачи видеопотока на вычислительный узел. Искусственно создаваемые шумы позволяют уменьшить ошибки при появлении реальных помех

3. Выделение объектов

После генерации сегментированного изображения следует этап поиска объектов на изображении. Для каждого из возможных классов осуществляется поиск по цвету, привязанному к классу. После чего для изображения, содержащего только один цвет выполняется морфологическая операция замыкания, помогающая сделать контуры более однородными (рис. 3.). После поиска областей, происходит выделение их контуров. В том случае, если несколько контуров разрозненны, но расположены близко (рис. 4.) происходит их объединение. Исходя из положения контура, генерируется прямоугольник, ограничивающий объект.

Способ выделения дороги отличался от других объектов. Для дальнейшего поиска дорожной разметки необходимо определение части дороги, по которой может передвигаться автомобиль. В случае, если дорога имеет сплошную разметку, полосы дороги выделяются отдельно. Если разметка прерывистая выделяется все дорожное полотно, включая прерывистую разметку. На этапе выделения находится наибольший контур дороги на изображении, полагая, что машина едет по дороге в момент детекции. Кроме того, дорога,

по которой передвигался колесный робот содержит пешеходные переходы, которые не оказывают влияния на работу дальнейших алгоритмов. В связи с этим было принято решение определять пешеходные переходы нейронной сетью и скрывать их на итоговом сегменте дороги.



Рис. 3. Применение операции замыкания



Рис. 4. Пример необъединенных контуров

4. Эксперименты

Описанный подход использовался для проезда колёсного робота по макету городской инфраструктуры (рис. 5). Макет имеет размер 6x4 и оборудован, дорожным полотном с разметкой, дорожными знаками, другими автомобилями, пешеходами, светофорами, в том числе светофорами с дополнительной секцией. Колесный робот изображён на рисунке 6. Особенность архитектуры заключается в том, что все вычисления происходят на удаленном узле. Благодаря этому появляется возможность работать с модулями, требующими более высокой производительности, что приближает макет к реальным транспортным средствам.

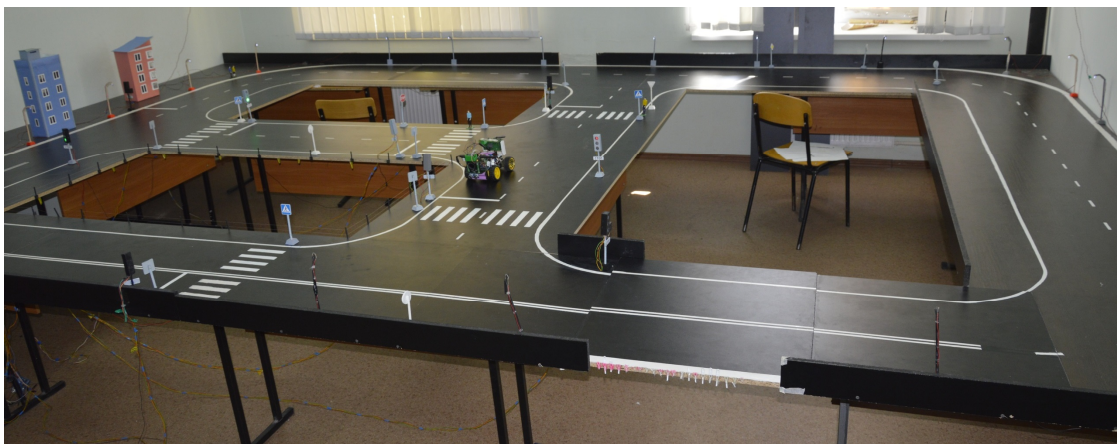


Рис. 5. Макет дорожной инфраструктуры

Запуск нейронной сети проводился на видеокарте NVIDIA GTX 1080. Время генерации одного сегментированного изображения составляет в среднем 0.063 сек, что обеспечивает скорость, достаточную для передвижения по макету. Для тестирования полученная нейронная сеть и подсистема выделения объектов были интегрированы в основной проект, написанный с использованием фреймворка ROS. Первый узел подписывается на

изображение с камеры, генерирует сегментированное изображение и публикует его. Второй узел подписывается на обычное и сегментированное изображение, выделяет объекты и публикует следующие сообщения: дорожное полотно, дорожный знак, который отправляется на классификацию, светофор, который отправляется на модуль определения сигнала, сообщение, содержащее пешеходов и автомобиль, которое отправляется на модуль слияния объектов. Найденные объекты добавляются в базу, после чего пересылаются в узел генерации управляющего сигнала, в котором происходит анализ данных и создание управляющих команд для колёсного робота.

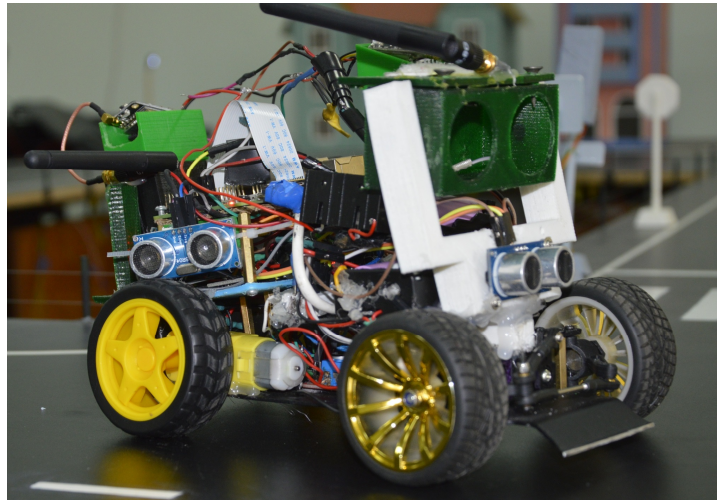


Рис. 6. Колёсный робот

Выводы

В рамках работы был получена полносверточная нейронная сеть, локализирующая основные объекты дорожной инфраструктуры, такие как дорожное полотно, пешеходные переходы, автомобили, светофоры, дорожные знаки. На основе данной нейронной и модуля визуализации были написаны два узла ROS, интегрированные в основной проект. Результаты были протестированы на макете, имитирующим городскую среду.

Список литературы:

1. А. Буйвал, М. Любимов, А. Габдуллин «Обнаружение и локализация дорожных знаков на основе данных камеры и лидара» // 11-я Международная конференция по машинному зрению (ICMV 2018) - Мюнхен, Германия 2018.
2. Кордтс М., Омран М., Рамос С., Рехфельд Т., Энцвайлер М., Бененсон Р., Франке У., Рот С., Шиле Б. «Набор данных городских пейзажей для понимания семантической городской сцены» / M. Cordts. 2016г.
3. Хэншуан З., Цзяньпин С., Сяоцзюань В., Сяоган В., Цзя Дж. «Сеть пирамидального разбора сцены» / З. Хэншуан. CVPR 2017 г.
4. С. Хоссейн, З. Хайдер «Обнаружение и распознавание дорожных знаков для автомобильного транспорта», Международный журнал компьютерных приложений (2015).
5. Кайминг Х., Сяньюй З., Шаоцин Р., Цзянь С. «Глубокое остаточное обучение для распознавания изображений» / Х. Кайминг, З. Сяньюй, Р. Шаоцин, С. Цзянь – Microsoft Research 2015 г.

References:

1. A. Buyval, M. Lyubimov, A. Gabdullin «Road sign detection and localization based on camera and lidar data» //The 11th International Conference on Machine Vision (ICMV 2018) — Munich, Germany 2018r.
2. Cordts M., Omran M., Ramos S.,Rehfeld T.,Enzweiler M., Benenson R., Franke U., Roth S., Schiele B. «The Cityscapes Dataset for Semantic Urban Scene Understanding» / M. Cordts. 2016r.
3. Hengshuang Z., Jianping S., Xiaojuan Q., Xiaogang W., Jiaya J. «Pyramid Scene Parsing Network» / Z. Hengshuang. CVPR 2017r.
4. Md. S. Hossain, Z. Hyder «Traffic Road Sign Detection and Recognition for Automotive Vehicles», International Journal of Computer Applications (2015r.)
5. Kaiming H, Xiangyu Z,Shaoqing R,Jian S «Deep Residual Learning for Image Recognition» / H. Kaiming, Z. Xiangyu, R. Shaoqing, S Jian – Microsoft Research 2015 г.

6. Дж. Лонг, Э. Шелхамер, Т. Даррелл «Полносверточные сети для семантической сегментации» // CVPR 2015 г.
7. А. Могельмосе, М. М. Триведи, Т. Б. Меслунд, «Обнаружение и анализ дорожных знаков на основе видения для интеллектуальных систем помощи водителю: перспективы и исследование», «Операции IEEE в интеллектуальных транспортных системах» (2012 г.)
8. А. Д. Пон, О. Андриенко, А. Хараке, С. Л. Уослендер «Иерархическая глубокая архитектура и метод выбора мини-партии для совместного обнаружения дорожных знаков и света» 15-я конференция IEEE по компьютерному и робототехническому видению (2018 г.)
6. J. Long, E. Shelhamer, T. Darrell «Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation» // CVPR 2015г.
7. A. Møgelmoose, M. M. Trivedi, T. B. Moeslund, «Vision based Traffic Sign Detection and Analysis for Intelligent Driver Assistance Systems: Perspectives and Surve,» IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, (2012).
8. A. D. Pon, O. Andrienko, A. Harakeh, S. L. Waslander «A Hierarchical Deep Architecture and Mini-Batch Selection Method For Joint Traffic Sign and Light Detection» IEEE 15th Conference on Computer and Robot Vision (2018).

Статья поступила в редколлегию 18.09.19.

Рецензент: д.т.н., профессор,

Брянский государственный технический университет

Лозбинец Ф.Ю.

Статья принята к публикации 30.09.19.

Сведения об авторах:

Азарченков Андрей Анатольевич

Кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Тел.: +7 (910) 230-90-35

E-mail: azarchenkovaa@gmail.com

Любимов Максим Сергеевич

Студент ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Тел.: +7 (930) 720-90-00,

E-mail: max32@inbox.ru

Лушков Владислав Игоревич

Студент ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Тел.: +7 (952) 967-55-47,

E-mail: lyshkoff2017@yandex.ru

Information about authors:

Azarchenkov Andrey Anatolevich

Ph.D, Associate Professor of IT, FSBEI HE «Bryansk State Technical University»,

Tel.: +7 (910) 230-90-35

E-mail: azarchenkovaa@gmail.com

Lyubimov Maxim Sergeevich

Student FSBEI HE «Bryansk State Technical University»

Tel.: +7 (930) 720-90-00,

E-mail: max32@inbox.ru

Lushkov Vladislav Igorevich

Student FSBEI HE «Bryansk State Technical University»,

Tel.: +7 (952) 967-55-47,

E-mail: lyshkoff2017@yandex.ru

УДК: 004.946

DOI: 10.30987/2658-3488-2019-2019-4-44-48

А.Н. Феофанов, А.В. Охмат, А.В. Бердюгин

VR/AR-ТЕХНОЛОГИИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В статье рассматриваются понятия виртуальной и дополненной реальностей. Проведено их сравнение с целью выявления сходств и различий. Выявлены области применения данных технологий, приведены примеры их использования. Определены пути применения VR/AR-технологий в машиностроении, в частности, на этапе эскизного проекта жизненного цикла изделия. Приведены примеры использования VR/AR-технологий в российских промышленных компаниях.

Ключевые слова: виртуальная реальность, дополненная реальность, машиностроение, проектирование, VR, AR.

A.N. Feofanov, A. V. Okhmat, A.V. Berdyugin

VR / AR TECHNOLOGIES AND THEIR APPLICATION IN MECHANICAL ENGINEERING

The article discusses the concepts of virtual and augmented realities. The comparison of them was carried out in order to identify their similarities and differences. The areas of application of these technologies are identified, and the examples of their use are given. The ways of application of VR/AR technologies in mechanical engineering are defined, in particular, at the stage of the outline design of the product life cycle. The examples of the use of VR/AR technologies in Russian industrial companies are given.

Keywords: virtual reality, augmented reality, mechanical engineering, design, VR, AR.

Введение

В настоящее время всё большее значение придается понятию «Виртуальная реальность» («Virtual Reality»). Данное понятие встречается во всех отраслях: от видеоигр до различных сфер машиностроения, в том числе и для проектирования объектов. Обычно, в повседневной жизни под понятием VR подразумевают всё обилие технологий, связанных с представлением виртуальной реальности. Очень часто, подразумевая VR-технологии, говорят о «Дополненной реальности» («Augmented Reality»). Прежде всего необходимо дать определение каждому из этих терминов.

VR-технологии – это специально разработанная цифровая среда, заменяющая наш реальный мир, где пользователи точно также слышат звуки и видят искусственные образы вокруг себя, словно находясь внутри него [1]. AR-технологии – это проецирование виртуальных (цифровых) объектов в реальном мире. Исходя из этого, можно сделать следующие выводы: VR блокирует реальный мир и погружает пользователя в цифровую вселенную, а AR внедряет элементы цифрового мира в реальный [2].

1. Сравнение VR и AR технологий

Рассмотрим более подробно VR и AR технологии на нижеприведённых примерах. Используя специально-разработанный гаджет VR-очков или VR-шлем, нам доступна возможность «погрузиться» в вымышленный мир – это тот мир, в котором человек видит трехмерное изображение – виртуальный мир. При движении по комнате и поворачивая голову, программа с помощью датчиков и гироскопов автоматически перестраивает изображение под точку обзора человека, благодаря чему создается ощущение реального присутствия в вымышленном пространстве. Используя VR-перчатки, пользователь получает возможность тактильно ощущать цифровые предметы. Таким образом, человек получает возможность посетить Национальный музей вычислительной техники Великобритании, используя только средства виртуальной реальности.

Примером использования AR-технологий может являться проецирование

технологического оборудования, бытовой, аудио-видео техники и др. в помещении с помощью камеры телефона или AR-очков. Такую технологию можно использовать при планировке цеха: изменяя тип и габариты проецируемого технологического оборудования, появляется возможность спроектировать будущие проекты этого помещения, используя только цифровые копии.

В ходе исследования VR и AR технологий были сформированы критерии, с целью выявления сходств и различий между ними. Данными критериями являются:

- определение;
- устройства и оборудование;
- стоимость устройств и оборудования;
- основные области применения;
- удобство использования.

Результаты сравнительного анализа приведены в таблице (см. табл. 1).

Таблица 1. Сравнение VR и AR технологий

Технология/критерии	Виртуальная реальность (VR)	Дополненная реальность (AR)
Определение	Специально разработанная цифровая среда, заменяющая наш реальный мир, где пользователи точно также слышат звуки и видят искусственные образы вокруг себя, словно находясь внутри него.	Проецирование виртуальных (цифровых) объектов в реальном мире
Устройства и оборудование	Шлем (+ смартфон), контроллер, очки(+ смартфон), перчатки, костюмы и комнаты виртуальной реальности	Очки, смартфон, планшет
Стоимость устройств и оборудования	Стоимость достаточно вариативна. От нескольких сотен до миллионов рублей	В основном, стоимость очков варьируется от 10 до 300 тысяч рублей. В настоящий момент перечень смартфонов и планшетов, поддерживающих AR-технологии достаточно обширен. Минимальная стоимость таких устройства находится в районе 10 тысяч рублей
Основные сферы применения	Видеоигры, образование, машиностроение, туризм и искусство	Видеоигры, маркетинг, машиностроение
Удобство использования	От продолжительного использования VR-устройств сильно устают глаза и шея (шлемы и громоздкие очки). Возможно головокружение. Требуется определённая физическая подготовка	Использование смартфонов и планшетов в качестве AR-устройства создаёт минимальные неудобства для пользователя. AR-очки, обычно, гораздо комфортнее в использовании чем VR-очки. В первую очередь, это связано с тем, что они значительно меньше весят

Исходя из сравнительного анализа, который приведён в таблице 1, со вывод, что VR и AR технологии имеют как сходства, так и отличия. Основное различие заключается в определении данных терминов. А основным сходством является то, что многие сферы

применения данных технологий пересекаются друг с другом и используются совместно (в дальнейшем VR/AR-технологии).

2. Области применения VR/AR-технологий

Более подробно рассмотрим области, в которых используются VR/AR-технологии:

- машиностроение - один из первых известных VR/AR-проектов был запущен в 1992 году компанией Boeing. За счет визуализированного представления жгута проводов для прокладки по периметру корпуса самолета и представления схем сборки этих жгутов проводов удалось ускорить монтаж и снизить вероятность ошибок при работе. Термин «дополненная реальность» как раз и появился во время реализации данного проекта [3];

- образование - VR-технологии предоставляют материалы в более приемлемом, интересном, доступном, увлекательном, и легком для восприятия виде;

- туризм и искусство – с помощью VR-технологий появилась возможность посещать музеи, отправляться в путешествия. «Создание виртуальных пространств поможет сэкономить на создании интерактивного музея, к тому же добавляет некоторые возможности, которые достаточно сложно реализовать в реальности. Одним из примеров создания VR/AR-музея является «Дворец школьников» в городе Астана. Музей помогает детям в выборе их будущей профессии» [4];

- маркетинг – в пример использования AR-технологий в маркетинге можно привести рекламную кампанию компании «ИКЕЯ». В рекламе демонстрируется возможность проецирования предметов интерьера с помощью камеры планшета;

- видеоигры – игровая индустрия является одной из первых отраслей, в которых стали применять VR/AR-технологии. В настоящее время существует множество игр с использованием виртуальной и дополненной реальностью, используя VR/AR-устройства. Наиболее известными среди них являются: HTC Vive, Oculus Rift, Sony Playstation VR, Samsung HMD Odyssey Plus.

3. Применение VR/AR-технологий в машиностроении

Рассмотрим более подробно VR/AR-технологии в машиностроении. Системы виртуальной реальности воспроизводят компьютерные модели отдельных машиностроительных узлов, деталей, зданий, сооружений, оборудования и техники в трехмерном изображении, с возможностью их визуализации, просмотра, сборки разборки и т.д. [5].

В настоящее время, для сокращения сроков проектирования изделия в машиностроении используются VR/AR-технологии, а, следовательно, на данный момент для работы с его виртуальным цифровым прототипом необходимо использовать передовой опыт IT-технологий типа VR. При анализе проекта на стадии эскизирования VR-технологии позволяют проверить компоновку, оценить эргономику, выявить коллизии, изменить внешний вид объекта, а также, внести необходимые изменения. Такие технологии помогают формировать и подготавливать визуализированные представления информационных материалов. Данный подход использования VR-устройств возможен для моделирования сборочных операций, проведения анализа и возможности оптимизации процессов изготовления изделий.

В качестве примера использования VR/AR-технологий в области машиностроения в России можно привести такие компании, как: СИБУР, «Газпром нефть»

VR-технологии в СИБУРе используются для визуализации правил охраны труда и промышленной безопасности. Помимо этого, в компании СИБУР спроектировали тренажер по ремонту оборудования с применением VR-технологий. Тренажер обучает работников ремонту компрессора по производству полиэтилена. В ходе проектирования тренажера была спроектирована 3D-модель оборудования и наиболее частая операция данного инструмента – замена блок-цилиндра. Пример схемы компрессора изображен на рис. 1.

Обозначение цифр на рисунке 1: 1 – шариковый подшипник; 2 – картер; 3 – вкладыш шатуна; 4 – шатун; 5 – маслосъемное кольцо; 6 – палец поршня; 7 – компрессионное кольцо; 8 – головка блока цилиндров; 9 – прокладка головки блока цилиндров; 10 – блок цилиндров; 11 – прокладка нижней крышки компрессора; 12 – нижняя крышка картера

VR-тренажер создавался для следующих целей:

- уменьшение времени проведения ремонта;
- более подробное изучение работы оборудования;
- повышение качества ремонта (исключение повторного отказа блок-цилиндров после проведения ремонта);

- выделение ошибок при ремонте и предложение путей решения их устранения;
- улучшение навыков работы персонала с современными цифровыми технологиями.

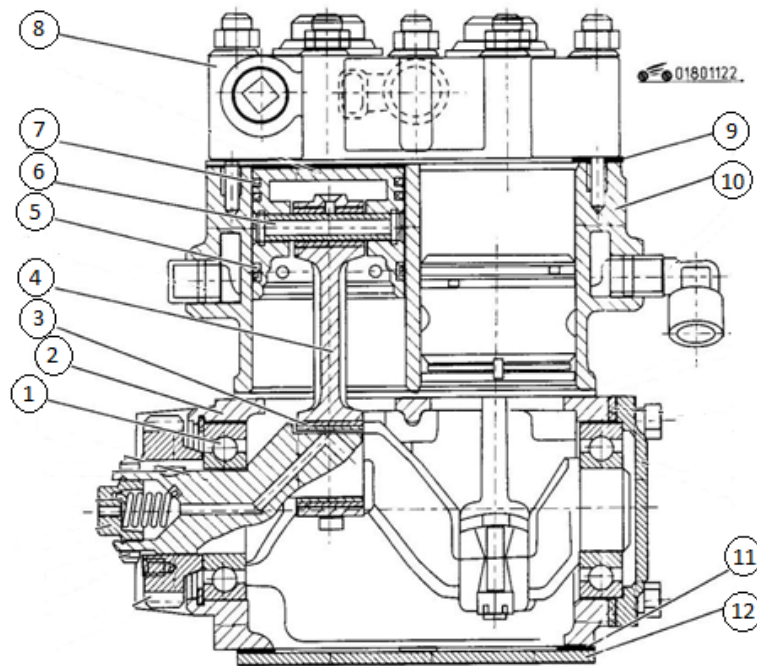


Рис.1 Схема компрессора

Компания «Газпром», в рамках развития VR/AR-технологий сотрудничает с такими компаниями как «НТС» (ведущая компания в области создания VR/AR-оборудования) и «Modum Lab» (разработчик аналитических и образовательных бизнес-продуктов на основе иммерсивных технологий (технологии полного или частичного погружения в виртуальный мир) для устройств виртуальной и дополненной реальности)

В компании «Газпром нефть» VR/AR-технологии применяются для обучения сотрудников и для визуализации процессов технического обслуживания и ремонта оборудования.

Выводы

В результате проведенного исследования сформулированы сходства и различия между VR/AR-технологиями. Выявлено, что во многих сферах данные технологии применяются совместно. Рассмотрен этап эскизного проекта с целью обнаружения общих принципов использования технологий виртуальной реальности в области машиностроения. Приведенные примеры использования VR/AR-технологий в машиностроении показывают целесообразность их применения в данной области.

Список литературы:

1. AR vs VR vs MR: различия технологий и сферы применения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dtf.ru/gamedev/75208-ar-vs-vr-vs-mr-razlichiya-tehnologiy-i-sfery-primeneniya>, свободный. – (дата обращения: 21.11.2019).
2. Все, что нужно знать про VR/AR-технологии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rb.ru/story/vsyo-o-vr-ar/>, свободный. – (дата обращения: 21.11.2019).
3. Дополненная реальность в российской промышленности: бесполезна или необходима

References:

1. AR vs VR vs MR: differences in technologies and applications [electronic resource]. - Access mode: <https://dtf.ru/gamedev/75208-ar-vs-vr-vs-mr-razlichiya-tehnologiy-i-sfery-primeneniya>, free. (date of application: 21.11.2019).
2. All, VR VR / AR-technologies [electronic resource]. - Access mode: <https://rb.ru/story/vsyo-o-vr-ar/>, free. (date of application: 21.11.2019).
3. Augmented reality in the Russian industry: useless or necessary [Electronic resource]. - Access mode:

[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vc.ru/flood/32831-dopolnennaya-realnost-v-rossiyskoy-promyshlennosti-bespolezna-ili-neobhodima>, свободный. – (дата обращения: 21.11.2019).

4. Маслов Е.А., Хаминова А.Е. Внедрение современных технологий виртуальной и дополненной реальности в креативные индустрии: тенденции и проблемы // Гуманитарная информатика. 2016. №8. С. 35–46.

5. Маркин Д.А., Новиков Е.А. Возможности использования систем виртуальной реальности в машиностроении // Достижения и перспективы технических наук Сборник статей Международной научно-практической конференции. НАУЧНЫЙ ЦЕНТР «АЭТЕРНА». Уфа. 2014. С. 20–22.

<https://vc.ru/flood/32831-dopolnennaya-realnost-v-rossiyskoy-promyshlennosti-bespolezna-ili-neobhodima>, free. (date of application: 21.11.2019).

4. Maslov E.A., Khaminova A. E. Introduction of modern technologies of virtual and augmented reality in creative industries: trends and problems / / Humanitarian Informatics. 2016. No. 8. Pp. 35-46.

5. Markin D. A., Novikov E. A. Possibilities of using virtual reality systems in mechanical engineering / / Achievements and prospects of technical Sciences Collection of articles of the International scientific and practical conference. SCIENTIFIC CENTER "AETERNA". Ufa. 2014. Pp. 20-22.

Статья поступила в редколлегию 18.11.19.

*Рецензент: д.т.н., профессор,
Брянский государственный технический университет
Захарова А.А.*

Статья принята к публикации 22.11.19.

Сведения об авторах

Феофанов Александр Николаевич

д.т.н., профессор, профессор кафедры «Инженерная графика», Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
тел.: +7 (903) 724 24 91
E-mail: feofanov.fan1@yadnex.ru

Охмат Андрей Владимирович

магистрант кафедры «Инженерная графика», Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
тел.: +7 (916) 735 83 30
E-mail: 95-andy@mail.ru

Бердюгин Антон Валериевич

аспирант кафедры «Информационные технологии и вычислительные системы», Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
тел.: +7 (917) 549 98 31
E-mail: chelsea1111@rambler.ru

Information about authors:

Feofanov Alexander Nikolaevich

Doctor of technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Engineering graphics", Moscow state technological University "STANKIN"
phone: +7 (903) 724 24 91
E-mail: feofanov.fan1@yadnex.ru

Okhmat Andrey Vladimirovich

master's student of the Department "Engineering graphics", Moscow state technological University "STANKIN"
phone: +7 (916) 735 83 30
E-mail: 95-andy@mail.ru

Berdyugin Anton Valerievich

post-graduate student of the Department "Information technologies and computer systems", Moscow state technological University "STANKIN"
phone: +7 (917) 549 98 31
E-mail: chelsea1111@rambler.ru

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: aim-pu@mail.ru

Вёрстка А.А. Алисов. Корректор А.Ю. Малюкина.

Сдано в набор 20.11.2019. Выход в свет 29.11.2019.

Объём 50 Мб. ОЗУ 512 Мб. Internet Explorer, Adobe Reader 5.0 и выше.

