

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТАВРІЙСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Журнал заснований у 1918 році

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 29 (68) № 3 2018

Частина 1

**Київ
2018**

Головний редактор:

Кисельов Володимир Борисович – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту муніципального управління та міського господарства Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського.

Члени редакційної колегії:

Медведєв Микола Георгійович (відповідальний секретар) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Домніч Володимир Іванович – кандидат технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Єремєєв Ігор Семенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Кузьменко Борис Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Огородник Станіслав Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Чумаченко Сергій Миколайович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;

Цомко Олена – доктор філософії по спеціальності «Безпека і управління інформацією», відділення комп'ютерної інженерії, Інститут Міжнародної освіти, Університет Донгсо, Республіка Корея.

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 10 від 12.06.2018 року)**

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки» зареєстровано Міністерством юстиції України (Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого ЗМІ серія КВ № 22895-12795Р від 11.08.2017 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України з технічних наук відповідно Наказу Міністерства освіти і науки України від 28.12.2017 № 1714 (додаток 7)

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ЗМІСТ

ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

Колосова Е.П., Ванин В.В., Колосов А.Е.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ.

1. Моделирование структуры ориентированных макроволоконистых композитов.....1

МАШИНОЗНАВСТВО

Сторож Я.Б.

ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКУ ЗА КРИТЕРІЄМ ОПОРУ ВТОМИ ГАЛЬМІВНОЇ СТРІЧКИ..... 8

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Івіцький І.І., Сокольський О.Л.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ПОЛІМЕРУ.....14

Котречко О.О.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ
И УДАРНОЙ МИКРОТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ..... 20

Сокольський О.Л., Герасименко Ю.Ю., Кушнір М.С.

МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНОГО ПРУТКА
В ПРОЦЕСІ ЗВАРЮВАННЯ ПРИСАДКОВИМ МАТЕРІАЛОМ..... 23

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

Кулалаев А.В., Кулалаев В.В.

ВВЕДЕНИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ
ПРИ СОЗДАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ..... 28

Фесенко О.Д.

ВДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ОРІЄНТАЦІЇ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА
В ТРИВИМІРНОМУ ПРОСТОРІ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ
ІНЕРЦІАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ НА ОСНОВІ ФІЛЬТРА МАДЖВІКА.....35

Шевчук Д.О., Панчук Л.В.

АНАЛІЗ І РОЗВИТОК СИСТЕМ ПОСАДКИ..... 43

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Новогрецкий С.Н., Подымака В.И., Прудников А.А.

ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО РЕАКТОРА
ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ПОДМАГНИЧИВАНИИ ЯРМА.....48

ПРИЛАДИ

Ткачук А.Г., Безвесільна О.М.

БУДОВА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ НОВОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО
ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ.....54

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Максимюк Т.А., Красько О.В., Думич С.С., Яремко О.М., Варенко А.М.

МЕТОД МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У ПАСИВНІЙ
ОПТИЧНІЙ МЕРЕЖІ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ФІКСОВАНОГО ТА МОБІЛЬНОГО ДОСТУПУ..... 59

Саміла А.П., Розорінов Г.М., Гресь О.В. РОЗРОБЛЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ МЕТОДІВ РАДІОСПЕКТРОСКОПІЇ ЯДЕРНОГО КВАДРУПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСУ НА ОСНОВІ ПРОГРАМОВАНОЇ ЛОГІЧНОЇ ІНТЕГРАЛЬНОЇ СХЕМИ.....	66
Семенов А.О. МОДЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ.....	74
ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ	
Андрощук А.В., Тарахтий О.С. СИСТЕМА УПРАВЛЕННЯ СВОЙСТВАМИ ТОПЛИВА ВВЭР-1000 С ПОДДЕРЖАНИЕМ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ.....	79
Андрущенко В.Б. НОВІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОШУКУ Й ОБРОБКИ ДАНИХ РЕСУРСУ ПРЕПРИНТІВ ARXIV.....	84
Віряк V.V., Войко O.V., Tarakhtii O.S. AN AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROL OF VVER-1000 FUEL PROPERTIES AT THE EXPENSE OF REACTOR POWER OPTIMIZATION.....	90
Бланарь П.Г., Бундюк А.Н., Улицкая Е.О. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ ДИНАМИКИ КОНТУРА ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ.....	95
Борейко М.Г., Будник М.М. РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРАТНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЯХТСМЕНІВ.....	101
Буслов П.В. РОЗРОБКА КЛАСИФІКАЦІЇ СИСТЕМ КОНСОЛІДАЦІЇ КОМЕРЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	105
Вовк І.В., Дуба І.Е., Конушбаєва Т.В., Беглов К.В. ВОДОГРІЙНА КОТЕЛЬНЯ ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ.....	109
Воєводін Є.В. МЕТОДИ ТЕСТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СТРАТЕГІЙ РОЗПОДІЛЕННЯ В СИСТЕМАХ ОРКЕСТРУВАННЯ ВІРТУАЛЬНИХ КОНТЕЙНЕРІВ.....	116
Dos E.V., Zuev D.O., Kropachev A.V., Vabkin O.V. MODELING AND MONITORING OF INFORMATION SYSTEM INFRASTRUCTURE.....	121
Ермаков И.А., Ложечников В.Ф. ИНВАРИАНТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ В УСТАНОВКЕ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПАРА ДЛЯ ЭНЕРГОБЛОКА 1000 МВт АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ.....	127
Киселёва Н.И., Погребной Я.С., Беглов К.В. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ С ЖИДКИМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ ДЛЯ ЭНЕРГОБЛОКА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ВВЭР-1000.....	134
Коваленко Д.М., Олещенко Л.М., Юрчишин В.Я. ДЕЯКІ ПИТАННЯ БЕЗПЕКИ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	141
Комлева Н.О. АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ НАВЧАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ «HANDY SOFT MAKER».....	146
Коротенко Г.М., Коротенко Л.М., Харь А.Т. ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ЗАДАЧАХ СОЦИАЛЬНО-ГИГИЕНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА.....	152

Кравчук Є.С., Сергеев-Горчинський О.О АНАЛІЗ ВЗАЄМОДІЇ ЗМІСТУ НАВЧАЛЬНИХ ДИСЦИПЛІН ЗА ЇХ СЕМАНТИЧНИМ ОПИСОМ.....	159
Левкин Д.А. АДЕКВАТНОСТЬ РАСЧЕТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭМБРИОН.....	166
Ніколов М.О., Макаренко А.В., Мартиш Є.В. АНАЛІЗ ПРОСТОРОВОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ПАРЕНХІМИ ПЕЧІНКИ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ РЕТИКУЛОСЦИНТИГРАФІЇ.....	170
Погромська Г.С., Христодоров О.В. ШИФРУВАННЯ ДАНИХ ЯК СКЛАДНИК СТВОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ГАЛУЗІ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ.....	174
Прищеп С.В. ВИЯВЛЕННЯ НОВИХ ПОДІЙ НА ОСНОВІ РЕЙТИНГУВАННЯ ДЖЕРЕЛ У TWITTER.....	180
Samoilenko D.M., Sivko O.E. HTTP DATA CIPHERING ALGORITHM.....	186

CONTENTS

APPLIED GEOMETRY, ENGINEERING GRAPHICS AND ERGONOMICS

Kolossova E.P., Vanin V.V., Kolosov A.E.

SOME ASPECTS OF GEOMETRICAL MODELING OF TECHNICAL OBJECTS
AND PROCESSES FOR FORMING POLYMER COMPOSITES.

1. MODELING OF THE STRUCTURE OF ORIENTED MACRO-FIBER COMPOSITES.....1

MACHINE SCIENCE

Storozh Ya.B.

RISK PREDICTION ACCORDING TO THE FATIGUE

RESISTANCE CRITERIA OF THE BRAKE BAND.....8

INDUSTRIAL ENGINEERING

Ivitskiy I.I., Sokolskiy O.L.

EXPERIMENTAL STUDY OF POLYMER MELTING PROCESS14

Kotrechko O.O.

METHODS FOR THE DETERMINATION OF STATIC

AND PERCUSSIONS MICROHARDNESS OF METALS AND THEIR ALLOYS20

Sokolskiy O.L., Herasymenko Yu.Yu., Kushnir M.S.

MODELING OF MELTING OF POLYMERIC BAR

IN THE WELDING PROCESS WITH FILLING MATERIAL.....23

AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

Kulalaev A.V., Kulalaev V.V.

ADOPTION OF THE CRITERION OF OPTIMAL DESIGN SOLUTIONS

WHILE DEVELOPMENT OF THE ENERGY SYSTEMS28

Fesenko O.D.

IMPROVED METHOD FOR ORIENTING UAVS IN THREE-DIMENSIONAL SPACE

WITH THE HELP OF MEMS INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

ON THE BASIS OF THE MADGWICK FILTER.....35

Shevchuk D.O., Panchuk L.V.

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF LANDING SYSTEMS.....43

ELECTRICAL ENGINEERING

Novogretskiy S.N., Podymaka V.Y., Prudnikov A.A.

THE CURRENT HARMONIC STRUCTURE OF THE THREE-PHASE REACTOR

WITH THE YOKE TRANSVERSE MAGNETIC BIASING48

EQUIPMENT

Tkachuk A.H., Bezvesilna O.M.

STRUCTURE AND PRINCIPLE OF OPERATION

NEW PRECISION PIEZOELECTRIC SENSING ELEMENTS

OF STABILIZATION SYSTEM54

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Maksymiuk T.A., Krasko O.V., Dumych S.S., Yaremko O.M., Varenko A.M. METHOD OF DATA FLOWS MULTIPLEXING IN PASSIVE OPTICAL NETWORK WITH INTEGRATED FIXED AND MOBILE ACCESS SEGMENTS.....	59
Samila A.P., Rozorinov H.M., Hres O.V. IMPLEMENTATION OF PULSED NQR RADIOSPECTROSCOPY METHODS ON FPGA.....	66
Semenov A.O. MODEL RESEARCH OF THE NON-LINEAR DYNAMICS OF RADIO-ENGINEERING DEVICES BASED ON A TRANSISTOR STRUCTURE WITH NEGATIVE RESISTANCE	74

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Androshchuk A.V., Tarakhtiy O.S. THE SYSTEM FOR CONTROL OF VVER-1000 FUEL PROPERTIES WHEN KEEPING THE COOLANT TEMPERATURE CONSTANT	79
Andrushchenko V.B. NEW INFORMATION TECHNOLOGIES FOR ARXIV DATA SEARCH, PROCESSING AND ANALYSIS	84
Biryak V.V., Boyko O.V., Tarakhtii O.S. AN AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROL OF VVER-1000 FUEL PROPERTIES AT THE EXPENSE OF REACTOR POWER OPTIMIZATION	90
Blanar P.G., Bundyuk A.N., Ulytskaia E.O. DESIGN OF THE MATHEMATICAL MODEL AND DYNAMICS ANALYSIS OF COMBINED HEAT AND POWER PLANT THERMAL ENERGY GENERATION CIRCUIT	95
Boreiko M.H., Budnyk M.M. DEVELOPMENT OF SOFTWARE-HARDWARE SYSTEM FOR MONITORING PHYSIOLOGICAL STATE IN YACHTSMEN	101
Buslov P.V. DEVELOPMENT OF CLASSIFICATION OF SYSTEMS OF CONSOLIDATION OF COMMERCIAL INFORMATION.....	105
Vovk I.V., Duba I.E., Konushbaieva T.V., Behlov K.V. WATER-HEATING BOILER-HOUSE AS AN OBJECT OF POWER CONTROL.....	109
Voievodin Ye.V. METHODS TO TEST EFFICIENCY OF BALANCING STRATEGIES IN VIRTUAL CONTAINERS ORCHESTRATION SYSTEMS	116
Dos E.V., Zuev D.O., Kropachev A.V., Babkin O.V. MODELING AND MONITORING OF INFORMATION SYSTEM INFRASTRUCTURE.....	121
Yermakov I.A., Lozhechnikov V.F. INVARIANT SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF LEVEL IN THE STEAM GENERATION AT POWER UNIT 1000 MW OF NUCLEAR POWER PLANT.....	127
Kiseleva N.I., Pogrebnoy Ya.S., Beglov K.V. RESEARCH OF POWER CONTROL SYSTEM WITH LIQUID ABSORBERS FOR NUCLEAR POWER PLANT WITH WWER-1000.....	134
Kovalenko D.M., Oleshchenko L.M., Yurchyshyn V.Ya. SOME SECURITY QUESTIONS IN INFORMATION SYSTEMS	141

Komleva N.O. ADAPTIVE CONTROL OF THE TEACHING SYSTEM OF THE SOFTWARE COMPLEX “HANDY SOFT MAKER”	146
Korotenko G.M., Korotenko L.M., Khar A.T. ONTOLOGICAL CLASSIFICATION CHEMICAL SUBSTANCES OF TECHNOGENIC ORIGIN IN SOCIAL-HYGIENIC MONITORING TASKS	152
Kravchuk Ye.S., Serheiev-Horchynskyi O.O ANALYSIS OF THE INTERACTION OF THE EDUCATIONAL DISCIPLINES CONTENT BY THEIR SEMANTIC DESCRIPTION	159
Levkin D.A. THE ADEQUACY OF CALCULATED MATHEMATICAL MODEL OF AN ACTION PROCESS OF A LASER BEAM ON AN EMBRYO	166
Nikolov M.O., Makarenko A.V., Martysh Ye.V. ANALYSIS OF SPATIAL INHOMOGENEITIES OF THE LIVER PARENCHYMIS IN DURING RETICULUM SCINTIGRAPHY	170
Pohromska H.S., Khrystodorov O.V. THE DATA ENCRYPTION AS OPERATION COMPONENT OF THE CREATION OF THE FREE SOFTWARE IN EDUCATIONAL PROCESS	174
Pryshchepa S.V. DETECTING NEW EVENTS BASED ON THE RATING OF TWITTER SOURCES	180
Samoilenko D.M., Sivko O.E. HTTP DATA CIPHERING ALGORITHM.....	186

ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

УДК 514.18: 678.5.05:004.925.8

Колосова Е.П.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Ванин В.В.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Колосов А.Е.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ И ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ.

1. Моделирование структуры ориентированных макроволоконистых композитов

Проанализированы вопросы геометрического моделирования технических объектов и процессов формования полимерных композитов на примере анализа подходов к моделированию структуры ориентированных макроволоконистых композитов. На базе структурных параметров модели проводится прогнозирование конструкторско-технологических параметров технических средств для получения армированных реактопластов.

Ключевые слова: моделирование, геометрия, структура, макроволокно, полимер, композит, реактопласт, объект, процесс.

Постановка проблемы. К настоящему времени в мире накоплен значительный опыт в области проектирования реактопластичных полимерных композиционных материалов (далее – ПКМ) функционального назначения. Основными структурными элементами таких материалов являются полимерная матрица, выполняющая связующую роль, и армирующий наполнитель, воспринимающий основную нагрузку в силовом композите.

При этом возрастает роль пространственно-армированных ПКМ на основе ориентированных (однонаправленных) (макро)волоконистых наполнителей (далее – ОВН). Преимущественные объекты их применения – легковесные ответственные (высоконагруженные) детали летательных, в т. ч. космических, аппаратов и механических силовых устройств (сосуды высокого давления, аппараты химических производств и др.); изделия «специального» (двойного) назначения (бронежилеты повышенной степени защиты, костюмы

с вплетенными в армирующую ткань нагревателями), перекрестно армированные глубоководные аппараты и др.

Разработка и внедрение пространственно-армированных материалов базируется на развитии и практической реализации соответствующих теорий. Причем эти теории имеют отличительные особенности для моделирования ПКМ на базе макро- и микронаполнителей. В то же время эти теории являются базисом для разработки реализующих их технологий.

Не претендуя на всеобъемлющее исследование, в настоящей работе представляем анализ только некоторых перспективных подходов к решению данной проблемы с точки зрения эффективности применения геометрического моделирования структуры ОВН.

Постановка задания. Целью статьи является краткий аналитический обзор особенности применения геометрического моделирования

структуры ориентированных макроволоконистых реактопластичных композитов, используемой для прогнозирования конструкторско-технологических параметров формования реактопластов, в частности процессов капиллярной пропитки и намотки.

Изложение основного материала исследования. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в области проектирования макроволоконистых реактопластичных ПКМ, моделирование их структуры является исключительно сложной научно-технической проблемой по ряду причин, связанных с особенностями их структурной организации. Причем до сих пор отсутствуют достаточно четкие теоретические представления, включая математические зависимости и соответствующие методики, позволяющие с достаточной степенью точности прогнозировать геометрические параметры адекватных структурных моделей таких материалов.

Такие модели используются, в частности, для прогнозирования конструктивно-технологических параметров технических средств формования ПКМ. В связи с этим при проектировании таких материалов с целью уменьшения материально-временных затрат применяют целый спектр методов моделирования: математическое, экспериментально-статистическое, компьютерное. При этом среди указанных методов моделирования геометрическому моделированию, работающему в «связке» с математическим моделированием, принадлежит одна из главных ролей.

Ниже рассмотрены некоторые подходы (как существующие, так и разработанные) к решению рассматриваемой проблемы, в т. ч. с применением современной методологии автоматизированного проектного моделирования.

Моделирование структуры однонаправленных макроволоконистых полимерных композитов. Согласно общепринятой концепции, различают два базовых подхода к проектированию конструктивно-технологических параметров технических средств формования и расчету элементов конструкций композитов на основе ОВН: феноменологический и структурный [1].

В рамках реализации первого подхода композит рассматривается как цельный материал с некоторым тензором приведенных упругих (вязко-упругих) характеристик. Второй подход базируется на предположении о гетерогенности свойств анализируемого континуума, который содержит цилиндрические включения (макроволоконна) произвольного сечения.

Первый подход из-за простоты его предпосылок более распространен. В то же время он может рассматриваться лишь как приближенный. Это обусловлено тем, что свойства составляющих структурных элементов композитов на основе ОВН различаются между собой весьма значительно (например, на порядок и более). Поэтому приведенные (усредненные) физико-механические константы такой монолитной системы часто теряют физический смысл. В то же время второй подход позволяет более адекватно моделировать параметры технологии, а также прогнозировать напряженно-деформированное состояние конструкций с учетом конкретного вида нагружения. Это обусловлено учетом реальной структуры исследуемых композитов на основе ОВН.

Так, например, при моделировании параметров базовых технологических процессов формования ПКМ, в частности процессов капиллярной пропитки и намотки, для описания переноса пропиточной жидкости в структуре ОВН используются и развиваются новые модельные физико-математические и процедурно-компьютеризованные подходы. Последние реализуются с использованием геометрических (структурных) моделей [2]. В настоящее время это прежде всего:

1) *структурно-сетевые модели* пористых и корпускулярных сред различных структур – «Pore Network Models» (случайные, регулярные и пр. решетки и регулярные упаковки);

2) методология и математический аппарат теории перколяции (percolation – пропитка или просачивание жидкостей через пористые материалы); для данных процессов – это рассмотрение условий переноса пропиточной жидкости в зависимости от статистических характеристик решеток, моделирующих дисперсные или пористые среды – аналог ОВН (перколяция по связям, перколяция по узлам) [3; 4];

3) *кластерный анализ* (cluster – пучок, связка) – статистическое выявление обособленных структур [5]; в задачах переноса (пропитка ОВН жидкими полимерными связующими) изучаются объединения – кластеры проводящих (или пропитываемых) участков, частиц, молекул и проч., их размеры, характеристики и связь с переносными свойствами жидкой среды;

4) *фрактальный анализ* – «Fractal Theory» (fractus – дробленый) – моделирование и изучение свойств геометрических элементов (линий, поверхностей, объемных образований), учитывающее изменение геометрических величин (длины, площади, объема) при изменении масштаба изме-

рения [6]. При этом часто все вышеперечисленные четыре подхода используются совместно.

Волокнистую структуру капиллярно-пористых тел в общем случае нельзя рассматривать как простую сумму линейных капилляров с одинаковым поперечным сечением. На практике капилляры в волокнистых системах существенно отличаются от цилиндрических трубок [7; 8]. К тому же, как правило, капилляр не является круглым, а его стенки – гладкими.

Рассматривая структуру ОВН как капиллярно-пористое тело, следует также учитывать, что форма и площадь поперечного сечения реальных капилляров могут изменяться в широких пределах по его длине [7; 8]. Кроме того, капилляры могут разветвляться, смыкаться, заканчиваться тупиками или порами большого объема [9]. Это предопределяет необходимость более подробного рассмотрения структурных моделей капиллярно-пористых тел.

Структура капиллярно-пористых тел чрезвычайно разнообразна. Общим для них является наличие твердой фазы и системы пустот в виде каналов и полостей. Твердую фазу таких тел называют скелетом (каркасом) тела, а систему пустот – пространством пор. Объемная доля пустот – это пористость ε , поверхность пустот – внутренняя поверхность, а ее величина, отнесенная к единице объема тела – удельная поверхность $S_{\text{уд}}$ [3; 4].

Капиллярные модели представляют собой пространство пор в виде системы каналов с определенными геометрическими свойствами. На рис. 1 приведены некоторые (наиболее часто используемые) структурно-сетевые модели капиллярных тел в виде одномерных моделей [2].

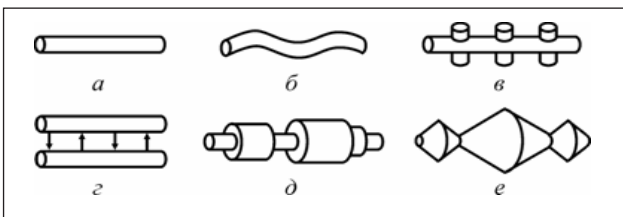


Рис. 1. Простейшие капиллярные модели пористых тел [2]: а – прямой канал; б – извилистый канал; в – канал с отходящими тупиковыми порами; г – система параллельных каналов с идеальной связью; д – серийная модель; е – периодический гофрированный канал

В модели одинаковых *прямых каналов* (рис. 1а) основные параметры модели – объемная доля каналов и их диаметр. В модели одинаковых параллельных *извилистых каналов* (рис. 1б) вводится дополнительный параметр искривленности капилляров – коэффициент извилистости β_0 .

Для учета *застойных (тупиковых) зон* (аналог «бутылочного» эффекта) в пористых материалах и их влияния на дисперсию примеси применяют модель канала с тупиковыми порами-ответвлениями (рис. 1в). Для учета влияния тупиковых пор вводится дополнительная величина – объемная доля тупиковых пор. В тех случаях, когда фильтрация жидкости моделируется неоднородной задачей и возникает дополнительный перенос жидкости поперек каналов, применяют модель каналов, связанных друг с другом развитой системой микропор (рис. 1г). Такая идеализация получила название модели параллельных капилляров с *идеальной связью*.

В *серийных моделях* (рис. 1д) учитывают переменность сечения пор, т. е. наличие сужений и расширений вдоль длины. Диаметр капилляра в серийных моделях меняется скачкообразно. *Гофрированные капилляры* (рис. 1е), в отличие от серийных моделей, имеют диаметр, непрерывно изменяющийся по длине. Заменяя пространство пор системой одномерных каналов, в общем случае можно учесть извилистость, гофрированность пор, их различные размеры и форму, а также наличие застойных зон. В то же время такие важные свойства пористых тел, как взаимосвязь отдельных капилляров и пересеченность пространства пор, практически не учитываются. Поэтому система одномерных капилляров может быть использована для адекватного описания капиллярных явлений только для идеализированных случаев.

Поэтому считается, что решетчатые модели наиболее полно отражают пространственную структуру пористых сред, а также взаимосвязь составляющих их элементов. На рис. 2 представлены некоторые *модели регулярных (квазирегулярных) решеток*.

Модель квадратной решетки, в узлах которой расположены частицы различной формы (рис. 2а), может быть использована, например, для описания процессов пропитки и фильтрации в пористых средах, образованных дисперсными макро-частицами.

Для описания подобных процессов в пористых средах, состоящих из частиц, применяют бидисперсные модели пористых сред (рис. 2б). Такие модели применимы, например, для описания процессов, протекающих в зернах катализатора (микропористых тел в зернистом слое). Еще одним примером применения таких моделей является описание процесса экстрагирования растительных тканей, характеризующихся регулярной структурой микро- и макропор.

При изготовлении ПКМ на базе перекрестно-армированных ОВН, например, стеклотекстолитов, в качестве стекловолоконистого армирующего наполнителя применяют различные виды стеклотканей сатинового, саржевого и полотняного переплетения [10] (см. рис. 3).

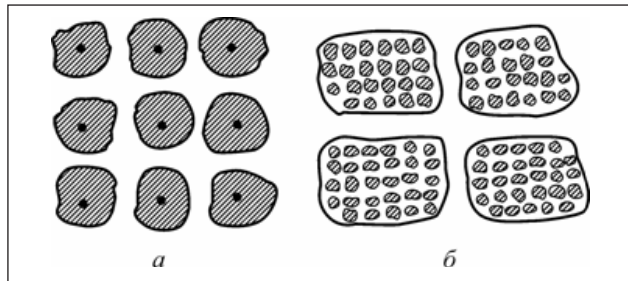


Рис. 2. Решетчатые регулярные модели [2]:
а – система частиц в узлах решетки;
б – бидисперсная модель

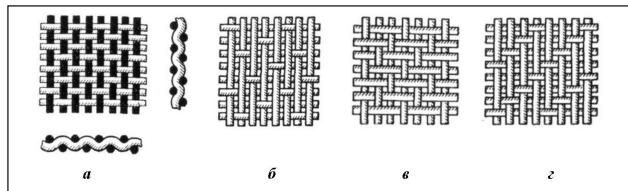


Рис. 3. Некоторые виды переплетения тканей [10]: а – полотняное; б – сатиновое; в и г – саржевое (ткани типа 1/2 и 3/1)

Структуру переплетения таких тканей можно представить как линейной моделью (в случае пропитки только одного слоя ткани, что наиболее часто и происходит на практике), так и регулярной решетчатой моделью (в случае одновременной пропитки нескольких расположенных один над другим слоев ткани либо стекломата). Также следует отметить, что для структуры таких армирующих тканей (см. рис. 3) характерна *симметрия*.

В общем случае представления о капиллярно-пористых средах намного шире описанных выше. Причем, чем сложнее структурная модель таких тел, тем сложнее ее геометрическая модель и математическое моделирование процессов переноса жидкой среды в ней. Поэтому следует находить некий баланс при выборе адекватной геометрической (структурной) модели капиллярно-пористых тел для конкретного технологического процесса. При этом необходимо учитывать как структуру реально используемого капиллярно-пористого тела, так и свойства пропитывающей жидкости.

Некоторые подходы к определению параметров адекватной геометрической модели ОВН.

Например, при детерминировании параметров кинетического уравнения процесса «свободной» капиллярной пропитки [2–4; 9] необходимо корректное нахождение структурных характеристик ОВН на базе его адекватной геометрической модели. В качестве таких характеристик рассматривают пористость ε , удельную внутреннюю поверхность $S_{\text{во}}$, а также эффективный (гидравлический) капиллярный радиус $r_{\text{эф}}$ ОВН.

Так, было разработано четыре подхода к определению параметров геометрической модели структуры ОВН, в т. ч. эффективного (гидравлического) капиллярного радиуса $r_{\text{эф}}$ [7; 8]. Первый из них – на основе микроструктурного анализа сечения шлифа эпоксидного композита на основе ОВН. Второй – определение $r_{\text{эф}}$ на основе анализа типичной кинетической кривой процесса «свободной» пропитки. Третий – определение $r_{\text{эф}}$ расчетным путем для модельного случая предельно уплотненного ОВН круглого сечения (для гексагональной упаковки волокон). Четвертый – определение $r_{\text{эф}}$ ОВН в зависимости от усилия его натяжения N при пропитке.

Краткое описание вышеупомянутых подходов (№ 3 – № 4) можно найти в работах [7; 8]. В то же время первый из указанных подходов заслуживает отдельного рассмотрения, что и делается далее.

Первый подход применим для определения структурных характеристик как для оптически прозрачных, так и оптически непрозрачных (например, металловолокнистых) ориентированных композиционно-волоконистых сред. Этот подход базируется на экспериментальном исследовании микроструктуры этих затвердевших сред и построении соответствующих кривых распределения, характеризующих эту микроструктуру.

Прежде всего адекватная модель структуры ОВН должна учитывать *стохастический характер* распределения волокон в структуре композита [11; 12]. По найденным параметрам геометрической модели структуры ОВН в оптимуме проводится выбор оптимальной схемы армирования и отработка рациональной технологии на этапе проектирования конструкции. Также осуществляется прогноз напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом характера действующей нагрузки [11–13].

Вариантом представлениям структуры ОВН является геометрическая модель структуры капиллярно-пористого тела, которая состоит из системы параллельно-извилистых капилляров различных радиусов. Ее можно формализовать

зовать с помощью функции распределения пор радиусом ρ по размерам $\varphi(\rho)$.

Разработанный подход к определению эффективного капиллярного радиуса $r_{эф}$ ОВН состоит в следующем. Делают микрошлиф сечения ПКМ в поперечном направлении и экспериментально исследуют распределение длин экстхорд волокон или функцию распределения $\varphi(\rho) = G(\ell)$ пор по размерам ℓ . При этом «экстхорды» обозначают расстояния между волокнами в сечении композита (т. е. эквивалентный диаметр, или удвоенный радиус $r_{эф}$ пор). В общем случае длины экстхорд носят случайный характер.

При выполнении условия наилучшего приближения теоретической и экспериментальной кривых распределения вычисляют пористость ε , удельную внутреннюю поверхность $S_{уд}$ и эффективный (эквивалентный) капиллярный радиус $r_{эф}$ искомого ОВН как капиллярно-пористого тела с помощью функции распределения длин экстхорд $\varphi(\rho) = G(\ell)$.

Для предельно армированных ПКМ на основе ОВН применяется геометрическая модель среды Г.А. Ванина. Последняя репрезентована системой круговых цилиндрических волокон, оси которых параллельны и расположены в узлах элементарной ячейки (двоякопериодической решетки параллелограммов). Пространство между волокнами заполнено связующей средой, а сечения волокон не должны накладываться друг на друга [11].

Элементарные ячейки такой геометрической модели изображены на рис. 4. Плоскость шлифа исследуемого композита на базе ОВН моделируется двоякопериодическим продолжением элементарной ячейки.

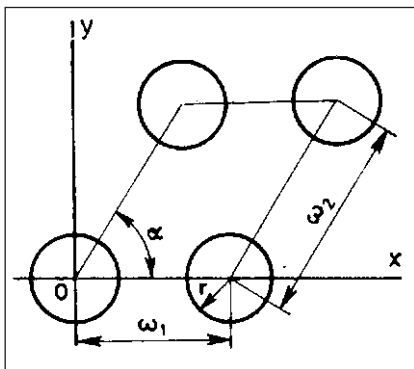


Рис. 4. Адекватная геометрическая модель ОВН с равновеликими узловыми окружностями [11]

В качестве параметров упаковки цилиндрических волокон выбраны длины его сторон ω_1 и ω_2 и угол между ними α . Единицей измерения расстояний в модельной плоскости для удобства при-

нята базовая длина стороны элементарной ячейки ω_1 . Критерием адекватности структурной модели исследуемого композита служит совпадение с определенной степенью точности (на практике составляющей не менее 90%) коэффициентов и вероятностных характеристик кривых распределений длин хорд окружностей и расстояний между соседними волокнами (экстхорд).

Также в указанных пределах достоверности должны находиться величины «пористости» ε и относительного содержания связующего в модельной плоскости и в натурном композите на базе ОВН соответственно.

Указанные величины определяются в результате замеров, проводимых вдоль случайной секущей прямой. Последняя «бросается» случайным образом в модельной плоскости и в плоскости микрошлифа поперечного сечения натурной оболочечной конструкции [13]. Для репрезентативности получаемых кривых распределений параметры секущей прямой $Y_d = \kappa X + D$, а именно угол наклона β и свободный член D являются случайными величинами, равномерно распределенными в интервале $(0, 1)$. Т. е. выполняется условие $\beta, D = var$.

Методика получения модельных и экспериментальных кривых распределений описана в работах [15; 16]. Следует отметить, что получение экспериментальных кривых распределений является весьма трудоемкой процедурой. А параметры случайной секущей для случая $\beta, D = var$ выбираются на основании результатов реализации алгоритма генерирования псевдослучайных чисел по методу Монте-Карло в интервале $(0, 1)$.

Методика детерминирования параметров адекватной геометрической модели структуры ОВН (см. рис. 6а – 6д), заключается в следующем [14]. От модели структуры ОВН, которая состоит из системы параллельно-извилистых капилляров различных радиусов (рис. 6а), и которая детерминируется с помощью функции распределения пор радиусом ρ по размерам $\varphi(\rho)$, переходят с помощью прогностических аналитических соотношений [14] к осреднению структуры ОВН как регулярной структуры линейных капилляров с одинаковым продольным сечением (рис. 6б).

Схема заполнения пропиточной жидкостью последних показана на рис. 6в, 6г (поперечное сечение ОВН). Т. е. в результате переходят к схеме пропитки единичного капилляра длиной ℓ (рис. 6д), диаметр которого равен $2r_{эф}$.

Следует отметить, что описанный выше подход к построению модельных кривых распределений (полученных как аналитически, так и в результате

численного эксперимента) длин хорд и экстхорд в структуре ОВН был заимствован из теории *интегральной геометрии и геометрических вероятностей* [15; 16] и адаптирован к ОВН в работах [17–19].

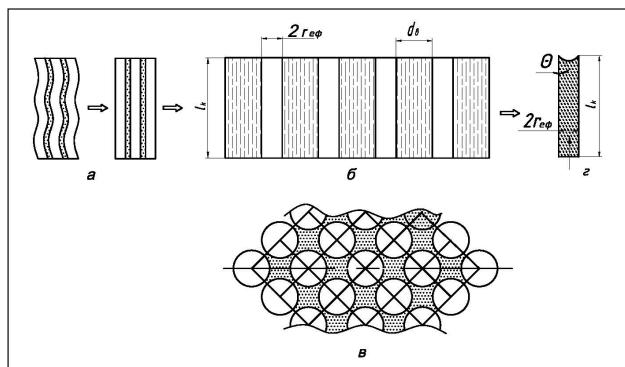


Рис. 5. Иллюстрация реализации методики построения (а – д) адекватной геометрической модели микроструктуры ОВН в технологии их «свободной» пропитки жидким эпоксидным связующим: $r_{эф}$ – эффективный капиллярный радиус; d_s – средний диаметр волокна; θ – краевой угол смачивания [19].

Эта теория находит все большее применение для решения ряда прикладных задач. В рамках этой теории изучают геометрические объекты случайного характера (точечных полей, прямых, мозаик и т. п.), которые инвариантны относительно групп преобразований пространства.

В частности, в теории геометрических вероятностей изучают выпуклые фигуры, которые пересекаются случайными прямыми. Причем эти фигуры могут иметь общую форму, быть или выпуклыми, или кругами. Основной используемый метод предполагает размещение на исследуемую область случайной прямой длиной L , т. н. секущей. После этого измеряются пересечения с фигурами, которые не имеют общих точек.

В дальнейшем рассмотренная выше геометрическая модель структуры ОВН (рис. 5) используется для детерминации параметров уточненной математической модели технологического процесса «свободной» пропитки ОВН эпоксидными связующими. Это проводится на базе использования классической теории фильтрации для ламинарного течения вязкой несжимаемой неньютоновской жидкости в капиллярно-пористом теле.

Различные вопросы геометрического моделирования структуры ориентированных макроволоконистых реактопластичных композитов, используемой для прогнозирования конструкторско-технологических параметров формирования реактопластов, в частности процессов «свободной» капиллярной пропитки и намотки, а также для расчета их напряженно-деформированного состояния, описаны в [17–19], а также в [20].

Геометрические схемы пространственно армированных макроволоконными структурами с различной структурой армирования представлены в справочнике [21]. В частности, рассмотрено влияние структурных (схем армирования) и технологических параметров (свойств арматуры и полимерной матрицы) на характеристики (эксплуатационные свойства) отвержденных композиционных материалов на их основе.

Отметим также, что при геометрическом моделировании таких структур, а также характера приложенных усилий и возникающих при этом напряжений в зависимости от напряженно-деформированного состояния, эффективным методом является использование *принципов симметрии* [22].

Выводы. Выполнен краткий аналитический обзор особенности применения геометрического моделирования структуры ориентированных макроволоконистых реактопластичных композитов, используемой для прогнозирования конструкторско-технологических параметров формирования реактопластов, в частности капиллярной пропитки и намотки. Предложена геометрическая модель стохастической структуры ОВН, которая построена на базе аппарата теории геометрических вероятностей и интегральной геометрии. Модель учитывает интегральные характеристики ОВН как капиллярно-пористого тела, а именно: пористость, удельный внутреннюю поверхность, эффективный (эквивалентный) капиллярный радиус. Параметры модели детерминируются с использованием аппарата теории геометрических вероятностей и интегральной геометрии. Перспективы дальнейших исследований заключаются в диссеминации описанных подходов на типичные структурные модели ориентированных композитов.

Список литературы:

1. Кристенсен Р. Введение в механику композитов: монография. М.: Мир, 1982. 336 с.
2. Коновалов В.И., Кудра Т., Гатапова Н.Ц. Современные вопросы теории переноса при сушке. Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2008. Т. 14. № 3. С. 538–559.
3. Хейфец Л.И., Неймарк А.В. Многофазные процессы в пористых средах: монография. М.: Химия, 1982. 320 с.

4. Чизмаджев В.С. Маркин М.Р. и др. Макрокинетика процессов в пористых средах: монография. М.: Наука, 1971. 364 с.
5. Ким Дж.О., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р., Олдендерфер М.С., Блэшфилд Р.К. Кластерный анализ. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / пер. с англ. под. ред. И.С. Енюкова. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
6. Федер Е. Фракталы: монография. М.: Мир, 1991. 254 с.
7. Колосов О.Є. До вибору фізичної моделі капілярно-пористого середовища на основі орієнтованих волокнистих наповнювачів. Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Машинобудування». 2010. № 59. С. 96–101.
8. Колосов О.Є. Аналіз структурних моделей капілярно-пористих тіл. Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2010. № 1 (5). С. 13–16.
9. Аксельруд Г.А., Альтшулер М.А. Введение в капиллярно-химическую технологию: монография. М.: Химия, 1983. 264 с.
10. Шалун Г.Б., Сурженко Е.М. Слоистые пластики: монография. Л.: Химия, 1978. 232 с.
11. Ван Фо Фы Г.А. Теория армированных материалов с покрытиями: монография. К.: Техніка, 1971. 232 с.
12. Иванченко Ф.К., Клявлин В.В., Колосов А.Е. Принципы построения модели структуры в теории армированных композиционных сред. Доклады АН УССР. Серия А. 1987. № 8. С. 25–29.
13. Kolosov A.E., Klyavlin V.V. Several aspects of determination of the adequate model of the structure of oriented fiber-reinforced composites. Mech. of Compos. Mater. 1989. Vol. 24. Is. 6. P. 751–757. DOI: 10.1007/BF00610779.
14. Колосова О.П., Ванін В.В., Вірченко Г.А., Колосов О.Є. Моделювання процесів виготовлення реактопластичних композиційно-волокнистих матеріалів: монографія. К.: ВПК «Політехніка» НТУУ «КПІ», 2016. 164 с.
15. Кендалл М. Дж., Моран П. Геометрические вероятности: монография. М.: Наука, 1972. 192 с.
16. Сантало Л.А. Интегральная геометрия и геометрические вероятности: монография. М.: Наука, 1983. 360 с.
17. Колосов О.Є. Одержання високоякісних традиційних та наномодифікованих реактопластичних полімерних композиційних матеріалів: монографія. К.: ВПК «Політехніка», 2015. 227 с.
18. Колосов О.Є., Сівецький В.І., Колосова О.П. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку: монографія. К.: ВПК «Політехніка», 2015. 295 с.
19. Колосова О.П., Ванін В.В., Колосов О.Є., Сівецький В.І. Моделювання процесів та обладнання для виготовлення реактопластичних матеріалів: монографія. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 235 с.
20. Kolosov A.E., Virchenko G.A., Kolosova E.P., Virchenko G.I. Structural and technological design of ways for preparing reactoplastic composite fiber materials based on structural parametric modeling. Chem. and Petrol. Eng. 2015. Vol. 51. Is. 7–8. P. 493–500. DOI: 10.1007/s10556-015-0075-3.
21. Тарнопольский Ю.М., Жигун И.Г., Поляков В.А. Пространственно-армированные композиционные материалы: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 224 с.
22. Стюарт Иэн. Истина и красота. Всемирная история симметрии: монография / пер. с англ. Ал. Семихатова. М.: Астрель, Корпус, 2010. 461 с.

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ГЕОМЕТРИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ.

1. МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ОРІЄНТОВАНИХ МАКРОВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИТІВ

Проаналізовано питання геометричного моделювання технічних об'єктів і процесів формування полімерних композитів на прикладі аналізу підходів до моделювання структури орієнтованих макрОВОЛОКНИСТИХ композитів. На базі структурних параметрів моделі проводиться прогнозування конструкторсько-технологічних параметрів технічних засобів для одержання армованих реактопластів.

Ключові слова: моделювання, геометрія, структура, фрактал, дисперсний наповнювач, полімер, композит, реактопласт, термопласт, об'єкт, процес.

SOME ASPECTS OF GEOMETRICAL MODELING OF TECHNICAL OBJECTS AND PROCESSES FOR FORMING POLYMER COMPOSITES.

1. MODELING OF THE STRUCTURE OF ORIENTED MACRO-FIBER COMPOSITES

The problems of geometrical modeling of technical objects and processes of forming polymer composites on the example of analysis of approaches to modeling the structure of oriented macro-fiber composites are analyzed. On the basis of structural parameters of the model, forecasting of design and technological parameters of technical means for obtaining reinforced thermosets is carried out.

Key words: modeling, geometry, structure, fractal, disperse filler, polymer, composite, thermoset, thermoplastic, object, process.

МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 331.45:001.57

Сторож Я.Б.

Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці

ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКУ ЗА КРИТЕРІЄМ ОПОРУ ВТОМИ ГАЛЬМІВНОЇ СТРІЧКИ

Проаналізовано наукові дослідження напружено-деформованого стану гальмівної стрічки стрічково-колодкового гальма бурової лебідки. Розраховано ймовірнісні характеристики небезпечного параметра міцності гальмівної стрічки – серійних конструкцій бурових лебідок. Отримано результати прогнозування ризику завдання виробничої травми персоналу внаслідок руйнування стрічки на ділянці розміщення кріпильних отворів. Запропоновано конструкторські й технологічні заходи для зменшення ризику травмування персоналу.

Ключові слова: прогнозування ризику, виробничий травматизм, гальмівна стрічка, стрічково-колодке гальмо, напружено-деформований стан, математична модель.

Постановка проблеми. Стрічково-колодке гальмо виділяється своїм визначальним впливом не тільки на продуктивність проходження свердловини, а й на безпечність для персоналу бурової установки. Велика маса високонавантажених елементів конструкції накопичує значний запас пружної потенціальної енергії, вивільнення якої під час можливого раптового, зокрема втомного, руйнування створює значну потенційну загрозу травмування персоналу. Тому опрацювання науково-методологічних підходів до прогнозування ризику руйнування стрічки стрічково-колодкових гальм бурових лебідок є проблемою важливою й актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш простими, надійними, а тому одними з найбільш поширених гальм для роботи в умовах великих силових і теплових навантажень є стрічково-колодкові гальма. Вони практично незамінні на бурових установках для геологорозвідувального й експлуатаційного, особливо глибокого, буріння нафтогазових свердловин [1–3]. Такі гальма обслуговують спуск бурильної колони під час заміни зношеного долота, повільне опускання в процесі робочої подачі долота на вибій, спуск обсадних труб, утримання колони на вазі для різних операцій тощо. У структурі затрат часу на будівництво свердловин середньої глибини спуско-підіймальні операції зазвичай мають до

40%, а для свердловин глибиною 4 500...5 000 м навіть до 60%. За даними [2; 3], під час буріння свердловини на цю ж глибину число циклів інтенсивного використання стрічково-колодкового гальма може сягати 50 000...80 000.

У свердловину пускають колони різної ваги з різними швидкостями. Швидкість спуску колони залежить від її ваги, довжини й технологічних особливостей свердловини. Найбільша швидкість спуску – 3 м/с, найменша під час спуску обсадних колон – 0,2 м/с. У процесі буріння подача бурового інструменту не перевищує 1,5 м/хв. Швидкість спуску регулюють допоміжним (гідравлічним або електричним), яке поглинає до 80...85% енергії спуску колони, і головними гальмами. Гальмування під час зупинки забезпечує лише головне гальмо. Навантаження на гак і зусилля у ведучій струні (вітці) канату під час зупинки залежить від часу і шляху гальмування та динамічних сил. Оскільки час гальмування нічим не обмежений і залежить лише від оператора (людський чинник), для уникнення надмірних динамічних навантажень, що можуть призвести до розриву каната, зусилля на гальмівних шківках мають створювати натяг каната не більшим за його розривне зусилля. У разі розриву однієї зі стрічок гальма зусилля гальмування другої стрічки має бути достатнім для завершення зупинки руху колони в цьому аварійному циклі.

Таблиця 1.

Розміри і властивості матеріалу гальмівної стрічки

Розміри, мм				Властивості матеріалу					
ширина b	Товщина $6^{+0,3/-0,5}$			модуль пружності, МПа E	коефіцієнт Пуассона μ	границя міцності під час розтягання-стискання, Мпа [6]			границя текучості, МПа [6], не менше σ_T
	h_{max}	$h_{сер.}$	h_{min}			$\sigma_{b,max}$	$\sigma_{b,сер.}$	$\sigma_{b,min}$	
220	6,3	5,9	5,5	$2 \cdot 10^5$	0,3	490	560	630	285

Сучасна практика проектування не передбачає розрахунку гальмівних стрічок за критерієм опору втоми. Вважається, що гальмівна стрічка працює на розтяг [1–3], тому її розраховують на статичну міцність за методикою одновісного розтягування гладкого стрижня. Хоча навіть спрощений аналіз конфігурації такої стрічки вказує на її належність до деталей із плоским деформованим станом, ускладненим концентраторами напружень.

Результатами дослідження математичної моделі напружено-деформованого стану ділянки стрічки підтверджено припущення щодо значної радіальної деформації стрічки, особливо в проміжку між накладками, виявлено визначальні впливи на її напружено-деформований стан (далі – НДС) величини проміжку L між накладками і товщини h стрічки, а також радіуса R шків (вплив найменший), розкрито істотно нелінійний характер впливу натягу Q стрічки та параметрів L , h і R на її НДС [4]. Досліджено нерівномірність розподілу сил у контакт «стрічка – накладка» – найбільші величини нормальних сил на краю накладки і неподалік найменші – та розкрито причини і закономірності впливу конструкції (параметрів L і h) фрикційного вузла та натягу Q стрічки на такий нерівномірний розподіл, запропоновано напрями зменшення цієї нерівномірності – зменшення товщини h гальмівної стрічки та проміжку L між накладками [5]. Результати досліджень засвідчили, що для розв’язання задачі виявлення НДС стрічки з потрібною точністю необхідне комплексне дослідження всього фрикційного вузла гальма.

Крім того, дослідження продемонстрували продуктивність використаного підходу поєднання чисельного методу аналізу з методом багатofакторного і багаторівневого планування експерименту із залученням комп’ютерних технологій для створення параметричних моделей НДС конструкцій. Таке поєднання дозволило виявити сумісний вплив (і його закономірності) основних чинників конструкції на її НДС. Такий методологічний підхід дозволяє реалізувати наукове обґрунтування заходів щодо підвищення

надійності й безпечності конструкцій на етапі їх проектування.

Постановка завдання. З огляду на важливість об’єкта, мета статті – на підставі опрацьованих у попередніх роботах науково-методологічних підходах виконати розрахунок загрози втомного руйнування гальмівної стрічки на прикладі конструкції серійного гальма і запропонувати заходи щодо запобігання виробничому травматизму.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для дослідження вибрано гальмівну стрічку серійних конструкцій бурових лебідок ЛБУ-1200 і У-2–5–5 [1; 3]. Її виготовляють із гарячекатаного прокату за ДСТУ 4484:2005 [6] вуглецевої сталі звичайної якості, ст. 5 ДСТУ 2651:2005 [7]. Розмірні і фізико-механічні характеристики матеріалу стрічки подано в табл. 1.

З наведеного вище випливає, що гальмівна стрічка піддається багатоцикловим повторно-змінним навантаженням із циклом, що пульсує. Такі деталі можуть руйнуватися від втоми. Розрахунок загрози їх руйнування потребує визначення середніх значень границі витривалості $\bar{\sigma}_{-1d}$ матеріалу деталі за симетричного циклу й амплітуди напружень $\bar{\sigma}_a$ у деталі, коефіцієнтів варіації границі витривалості v_{-1d} матеріалу деталі (з урахуванням абсолютних розмірів деталі, впливу концентраторів напружень і стану поверхонь) і v_a навантаження.

Середні значення межі витривалості $\bar{\sigma}_{-1}$ матеріалу стрічки за симетричного циклу визначимо за наближеною формулою:

$$\bar{\sigma}_{-1} = (0,42 \dots 0,46) \bar{\sigma}_b \quad [8],$$

$$\bar{\sigma}_{-1} = 0,43 \cdot \bar{\sigma}_b = 0,43 \cdot 560 = 241 \text{ МПа} .$$

Коефіцієнти впливу абсолютних розмірів деталі, концентраторів напружень і стану поверхонь для визначення межі витривалості $\bar{\sigma}_{-10}$ матеріалу гальмівної стрічки за симетричного циклу і результати обчислень для різних її ділянок (біля отвору, паза і поверхні з окалиною) зведено в табл. 2.

Складники формули для розрахунку коефіцієнта варіації v_{-10} межі витривалості матеріалу стрічки і результати обчислень зведені в табл. 3.

Отже, імовірнісні характеристики небезпечного параметра міцності гальмівної стрічки такі:

- $\bar{\sigma}_{-1\theta} = 95,8$ МПа – для перерізу стрічки з отворами (між накладками);
- $\bar{\sigma}_{-1\theta} = 92,6$ МПа – для перерізу стрічки з пазами (над накладками);
- $\bar{\sigma}_{-1\theta} = 168,6$ МПа – для ділянок стрічки без концентраторів;
- $\nu_{-1\theta} = 0,085$ – для всіх перерізів гальмівної стрічки.

Як встановлено вище, сила тертя на гальмівних шківках має створювати натяг каната не більшим за його розривне зусилля. Тому найбільше розривне зусилля $P_{к.мах}$ ведучої вітки каната (паспортна характеристика бурової лебідки), навитого на барабан лебідки, є основою для обчислення найбільшого натягу стрічки. За даними [3], $P_{к.мах} = 273$ кН. Тоді найбільшу силу гальмування $Q_{г.мах}$ створювану на одному гальмівному шківі, можна визначити за формулою:

$$Q_{г.мах} = \frac{P_{к.мах} D_{б.эф}}{2D_{шк}} = \frac{P_{к.мах} (D_{б} + (2z - 1)0,933d_{к})}{2D_{шк}} \quad [3], \quad (5.8)$$

де $D_{шк}$ – діаметр робочої поверхні гальмівного шківка, $D_{шк} = 1\,450$ мм; $D_{б}$ і $D_{б.эф}$ – діаметр і ефективний діаметр барабана лебідки, $D_{б} = 800$ мм; $d_{к}$ – діаметр каната, $d_{к} = 32$ мм; z – число витків каната на барабані, $z = 4$;

$$Q_{г.мах} = \frac{273(800 + (2 \cdot 4 - 1)0,933 \cdot 32)}{2 \cdot 1450} = 95 \text{ кН.}$$

Набіжна вітка гальмівної стрічки розтягується середньою силою \bar{Q}_n її натягу, яку визначають за середнього значення коефіцієнта тертя f_c у парі тертя «фрикційна накладка – гальмівний шків» [3]. За даними [4], f_c можна прийняти рівним 0,3. Тоді

$$\bar{Q}_n = \frac{Q_{г.мах} e^{f_c \varphi}}{e^{f_c \varphi} - 1} = 126 \text{ кН,}$$

де φ – кут охоплення гальмівного шківка стрічкою, $\varphi = 4,712$ рад (270°), а її збіжна вітка – середньою силою

$$\bar{Q}_z = \bar{Q}_n - Q_{г.мах} = 126 - 95 = 31 \text{ кН.}$$

Ймовірнісні характеристики чинників та результати обчислень зібрані в табл. 4.

Для подальшого обчислення ймовірнісних характеристик параметрів розрахункового напруження за математичними моделями потрібно середні й екстремальні значення чинників у натуральній системі координат перетворити на кодовану систему моделей. Результати перетворення й обчислень еквівалентних напружень зведені в табл. 5. Значення чинників, середніх еквівалентних напружень у перерізах стрічки, їхніх змін, коефіцієнтів впливу a_i , середньоквадратичних відхилень S_i , спричинених змінами окремих чин-

Таблиця 2

Границя витривалості матеріалу гальмівної стрічки для різних її ділянок

Характеристика	Коефіцієнти впливу			Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень для:		Межа витривалості матеріалу стрічки (у МПа) біля:		
	абсолютних розмірів	стану поверхні	чутливості до концентрації напружень					
				ϵ	β	q_σ	$\bar{\sigma}_{-1д}$	
Позначення	ϵ	β	q_σ	α_σ		$\bar{\sigma}_{-1д}$		
Значення	1	0,7	0,5	2,52	2,64	95,8	92,6	168,6

Таблиця 3

Коефіцієнт варіації $\nu_{-1\theta}$ межі витривалості матеріалу стрічки

Характеристика	Коефіцієнт варіації для матеріалу одного плавлення	Діапазон зміни границі міцності, МПа	Середньоквадратичне відхилення межі міцності, МПа	Коефіцієнт варіації для границі міцності	Коефіцієнт варіації радіуса спряження		Коефіцієнт варіації концентратора напружень	Коефіцієнт варіації межі витривалості
					отвір	паз		
Позначення, формула	ν_1	$\Delta\sigma = \sigma_{b.мах} - \sigma_{b.мін}$	$S_{\sigma_b} = \Delta\sigma/4,1075$	$\nu_2 = S_{\sigma_b}/\sigma_{b.сер}$	ν_p	ν_3	$\nu_{-1д}$	
Значення	0,06	140	34,08	0,06	0	0,01	0,003	0,085

ників, отриманих за результатами однофакторних експериментів, зібрані в табл. 6.

Обчислимо середньоквадратичні відхилення і коефіцієнти варіації середніх еквівалентних напружень для обох перерізів стрічки:

$$S_{\sigma_{екв.1}} = \sqrt{\sum S_i^2} = \sqrt{0,075^2 + 8,458^2 + 1,154^2 + 2,113^2} = 8,795 \text{ МПа};$$

$$S_{\sigma_{екв.2}} = \sqrt{\sum S_i^2} = \sqrt{0,070^2 + 10,283^2 + 0,899^2 + 1,277^2} = 10,379 \text{ МПа};$$

$$v_{\sigma_{екв.1}} = \frac{S_{\sigma_{екв.1}}}{\bar{\sigma}_{екв.1}} = \frac{8,795}{128,4} = 0,072;$$

$$v_{\sigma_{екв.2}} = \frac{S_{\sigma_{екв.2}}}{\bar{\sigma}_{екв.2}} = \frac{10,379}{121,9} = 0,081$$

Зауважимо, що наведені в табл. 5 еквівалентні напруження $\bar{\sigma}_{екв.1}$ і $\bar{\sigma}_{екв.2}$ мають двоїсту природу. Вони є середніми з огляду на ймовірнісний характер цих величин. Водночас щодо циклічного навантаження гальмівної стрічки вони є найбіль-

шими напруженнями в циклі пульсування. Фактичні амплітуди σ_a коливань, які одночасно рівні медіанним значенням σ_m цих напружень, становлять:

$$\bar{\sigma}_{a.1} = \bar{\sigma}_{m.1} = \frac{\bar{\sigma}_{екв.1}}{2} = 64,4 \text{ МПа};$$

$$\bar{\sigma}_{a.2} = \bar{\sigma}_{m.2} = \frac{\bar{\sigma}_{екв.2}}{2} = 60,9 \text{ МПа}$$

Для обчислення зведеної амплітуди поперечно визначимо коефіцієнт чутливості матеріалу стрічки до асиметрії циклу [10]:

$$\psi_{\sigma} = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \sigma_b = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot 560 = 0,13.$$

Тоді значення зведеної амплітуди еквівалентних напружень у небезпечних перерізах гальмівної стрічки становитимуть:

$$\bar{\sigma}_{a.зв.1} = \bar{\sigma}_{a.1} + \psi_{\sigma} \bar{\sigma}_{m.1} = 64,4 + 0,13 \cdot 64,4 = 72,8 \text{ МПа};$$

$$\bar{\sigma}_{a.зв.2} = \bar{\sigma}_{a.2} + \psi_{\sigma} \bar{\sigma}_{m.2} = 60,9 + 0,13 \cdot 60,9 = 68,8 \text{ МПа}.$$

Отримані величини і є середніми розрахунковими напруженнями для обчислення ризику трав-

Таблиця 4

Середньоквадратичні відхилення аргументів моделі напружень у гальмівній стрічці

Чинники	Натяг стрічки (коефіцієнт стабільності сили натягу)	Товщина стрічки, мм	Товщина фрикційної накладки, мм	Коефіцієнт тертя в контакт «стрічка – накладка»
	K_c	h	H	f
Характеристики				
Діапазон Δ розсіяння чинника	0,3 (1...1,3) [9]	0,8 (5,5...6,3), табл. 5.5	20 (10...30), табл. 5.5	0,4 (0,1...0,5) [4]
Закон розподілу	нормальний		рівної ймовірності	нормальний
Ймовірність Р, охоплення Δ	0,96	0,9 973	0,96	0,96
Розрахункова формула для S_i	$\Delta K_c/4,1 075$	$\Delta h/6$	$\Delta H/4,1075$	$\Delta f/4,1075$
S_i	0,073	0,133	4,869	0,097

Таблиця 5

Середні значення параметрів гальмівної стрічки

Середні значення чинників – натуральні і кодовані (у дужках)						Середні еквівалентні напруження, МПа
Q, кН	H, мм	L, мм	f	H, мм	$\bar{\sigma}_{екв.1}$	$\bar{\sigma}_{екв.2}$
126 (0,433)	20 (0)	30 (-1)	0,3 (0,2)	5,9 (0,9)	128,7	121,9

Таблиця 6

Результати однофакторних експериментів

Характеристики	Чинники для однофакторних експериментів:			
	Q, кН	H, мм	f	h, мм
Значення чинників	136 (0,6)	30 (1)	0,1 (-0,8)	5,5 (0,5)
Результати однофакторних експериментів для перерізу 1				
$\sigma_{екв.1}$	139,7	143,4	126,4	135,1
$a_{i.1}$	1,03	1,47	11,85	15,85
$S_{i.1}$	0,08	8,46	1,15	2,11
Результати однофакторних експериментів для перерізу 2				
$\sigma_{екв.2}$	131,5	139,7	120,6	125,7
$a_{i.2}$	0,96	1,78	6,15	-9,58
$S_{i.2}$	0,07	10,28	0,60	1,28

мування персоналу через руйнування гальмівної стрічки у двох її небезпечних перерізах:

– коефіцієнт запасу міцності за середніми напруженнями:

$$\bar{n}_1 = \frac{\bar{\sigma}_{-1d}}{\bar{\sigma}_{a.36.1}} = \frac{95,8}{72,8} = 1,316; \quad \bar{n}_2 = \frac{\bar{\sigma}_{-1d}}{\bar{\sigma}_{a.36.1}} = \frac{168,6}{68,8} = 2,45;$$

– квантиль нормованого нормального розподілу:

$$u_{p,1} = -\frac{\bar{n}_1 - 1}{\sqrt{\bar{n}_1^2 v_{-1d}^2 + v_{a,1}^2}} = -\frac{1,316 - 1}{\sqrt{(1,316 \cdot 0,085)^2 + 0,072^2}} = -2,373;$$

$$u_{p,2} = -\frac{\bar{n}_2 - 1}{\sqrt{\bar{n}_2^2 v_{-1d}^2 + v_{a,2}^2}} = -\frac{2,45 - 1}{\sqrt{(2,45 \cdot 0,085)^2 + 0,081^2}} = -6,49;$$

– ризику травмування персоналу за таблицями функції Лапласа:

$$R_1 = \Phi(u_{p,1}) = 0,0089, \text{ або } 0,89\%;$$

$$R_2 = \Phi(u_{p,2}) = 0.$$

Отримані результати показали таке:

– небезпечною є ділянка гальмівної стрічки з розміщеними на ній отворами для кріплення планок для розділення фрикційних накладок, що підтверджується практикою;

– ризик руйнування стрічки на цій ділянці істотний.

На завершення оцінимо вплив оптимізації розміщення отворів для кріплення планок для розділення фрикційних накладок (див. рис. 1). Зміщення отворів на 20 мм сприятиме зменшенню зведеної амплітуди $\bar{\sigma}_{a.36.1}$ еквівалентних напружень до $72,8 (1 - 0,0107) = 72$ МПа, квантиля нормованого нормального розподілу u_p до $-2,4632$ і, як результат, можна очікувати зниження ризику до 0,67%, тобто на $(0,89 - 0,67) / 0,89 \cdot 100 = 24,7\%$.

На завершення оцінимо вплив оптимізації розміщення отворів для кріплення планок для розділення фрикційних накладок (див. рис. 1). Зміщення отворів на 20 мм сприятиме зменшенню зведеної амплітуди $\bar{\sigma}_{a.36.1}$ еквівалентних напружень до $72,8 (1 - 0,0107) = 72$ МПа, квантиля нормованого нормального розподілу до $-2,4632$ і, як результат, можна очікувати зниження ризику до 0,67%, тобто на $(0,89 - 0,67) / 0,89 \cdot 100 = 24,7\%$.

Аналіз даних табл. 2 щодо коефіцієнтів впливу на витривалість матеріалу деталі дає підстави вважати, що основним напрямом зменшення ризику виробничого травматизму, спричиненого руйну-

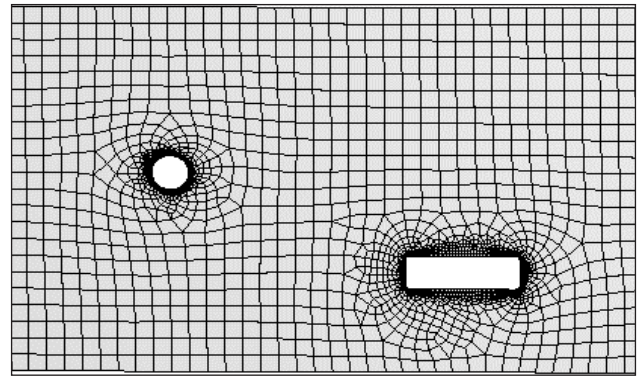


Рис. 1. Сіткова модель ділянки гальмівної стрічки з отвором і пазом

ванням гальмівної стрічки, є підвищення якості поверхні стрічки, передусім на невеликих ділянках біля отворів. Радіуси поверхні з підвищеною якістю (знята окалина за допомогою шліфувальної машинки з металевою щіткою) біля кожного отвору з обох боків стрічки можуть бути приблизно 2 діаметри отвору – на них істотно проявляються впливи концентратора напружень). Така обробка, цілком прийнятна і недорога для малосерійного виробництва, яким є виготовлення бурових лебідок, дозволяє збільшити коефіцієнт впливу стану поверхні β принаймні з 0,7 (поверхня з окалиною) до 0,8 (поверхня, отримана грубим точінням) [11]. Розрахунки показують, що навіть від збільшення β до 0,75 (тобто на 7,14%) можна очікувати зменшення до $-3,00$ і зменшення ризику нанесення травм персоналу до задовільної величини $-0,14\%$.

Висновки. Запропоновані конструкторські й технологічні заходи для зменшення ризику травмування персоналу – оптимальне розміщення концентраторів (очікується зменшення ризику на 24,7%) і підвищення якості поверхні невеликих ділянок стрічки біля кріпильних отворів шляхом шліфування металевими щітками (виявлено значний потенціал цього способу щодо можливого зниження ризику руйнування гальмівної стрічки). Варто також зазначити, що для підвищення надійності запропонованих підходів важливе створення надійної бази даних щодо ймовірнісних характеристик конструкційних матеріалів і умов виробництва.

Список літератури:

1. Алексеевский Г.В. Буровые установки Уралмашзавода. М.: Недра, 1981. 528 с.
2. Ильский А.Л. Буровое оборудование для бурения нефтяных скважин. Расчет и конструирование. М.: Машиностроение, 1980. 229 с.
3. Копей Б.В. Розрахунок, монтаж і експлуатація бурового обладнання: підручник для вищих навч. закладів. Івано-Франківськ, 2001. 446 с.
4. Стрічково-колодкові гальма: монографія: у 2 т. / Є.І. Крижанівський, О.І. Вольченко, М.О. Вольченко, Д.О. Вольченко, Я.Б. Сторож. Т. 2. Івано-Франківськ: Факел, 2007. 230 с.

5. Моделювання деформації гальмівної стрічки і розподілу сил у контакті «стрічка – фрикційна накладка» стрічково-колодкових гальм / О.І. Вольченко, Б.Д. Сторож, Я.Б. Сторож. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ: всеукраїнський щоквартальний наук.-техн. журнал. 2007. № 4 (25). С. 92–96.
6. ДСТУ 4484:2005/ГОСТ 535–2005. Прокат сортовий і фасонний зі сталі вуглецевої звичайної якості. Загальні технічні умови. Чинний від 25 листопада 2005 р. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 23 с.
7. ДСТУ 2651:2005. Сталь вуглецева звичайної якості. Марки. Чинний від 1 листопада 2006 р. Київ: Держспоживстандарт України, 2005. 33 с.
8. Серенсен С.В., Громан М.Б., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Валы и оси. Конструирование и расчет. 2-е изд., перераб. М.: Машиностроение, 1970. 320 с.
9. Справочник технолога-машиностроителя / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. 5-е изд., исправл., Т. 2. М.: Машиностроение-1, 2003, 944 с.
10. ГОСТ 25.504–82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. Введен с 1 июля 1983. М.: Госкомстандарт СССР, 1982. 132 с.
11. Опірматеріалів: підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський / за ред. Г.С. Писаренка. 2-ге вид., доповн. і переробл. К.: Вища школа, 2004. 655 с.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РИСКА ПО КРИТЕРИЮ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОРМОЗНОЙ ЛЕНТЫ

Проанализированы научные исследования напряженно-деформированного состояния тормозной ленты ленточно-колодочного тормоза буровой лебедки. Рассчитаны вероятностные характеристики опасного параметра прочности тормозной ленты – серийных конструкций буровых лебедок. Получены результаты прогнозирования риска нанесения производственной травмы персоналу вследствие разрушения ленты на участке размещения крепежных отверстий. Предложены конструкторские и технологические меры для уменьшения риска травмирования персонала.

Ключевые слова: прогнозирование риска, производственный травматизм, тормозная лента, ленточно-колодочный тормоз, напряженно-деформированное состояние, математическая модель.

RISK PREDICTION ACCORDING TO THE FATIGUE RESISTANCE CRITERIA OF THE BRAKE BAND

The paper presents analysis of scientific researches of the strain-stress state of the brake band of the drill winch bend-shoe brake. The probabilistic characteristics of the dangerous parameter of the braking band strength for the brake band of serial structures drill winches are calculated. The results of the prognostication of the personnel injuries risk owing to the brake band destruction on the site of the fixing holes were obtained. Finally were proposed design and technological measures to reduce the risk of personnel injury.

Key words: risk prediction, occupational injuries, brake band, band-shoe brake, strain-stress state, mathematical model.

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 678.057

Івіцький І.І.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сокольський О.Л.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ПОЛІМЕРУ

На базі віскозиметра типу «конус-площина» створена установка для дослідження процесу плавлення гранульованих термопластів. Запропоновано методика проведення експериментальних досліджень. Експериментально досліджено динаміку зміни частки твердої фази в суміші гранульованих термопластів із розплавом. Досліджено залежності в'язкості суміші твердих часток полімеру в розплаві від їх концентрації. Встановлено, що для різних полімерів за певних температурно-деформаційних режимів спостерігається максимум ефективної в'язкості суміші твердих часток із розплавом.

Ключові слова: дослідження, плавлення, віскозиметр, в'язкість, термопласт.

Постановка проблеми. Наявні моделі плавлення полімерів у робочих каналах полімерного обладнання в низці випадків показують якісно прийнятні результати [1–6], але не в змозі врахувати локальні зміни реологічних і теплофізичних властивостей полімерів, які можуть впливати на дійсний перебіг процесів перероблення. Крім того, для виробництва сучасних функціональних полімерних матеріалів важливо мати точну інформацію про характеристики процесу, оскільки введення функціональних компонентів у суміш відбувається під час плавлення [7–8]. Тому важливим є також експериментальне встановлення характеристик, які наразі не можуть бути визначені теоретично. Ці уточнені значення можуть бути використані у подальших аналітичних або числових розрахунках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розплави полімерів, на відміну від інших в'язкотекучих середовищ, мають малу питому вагу і коефіцієнт теплопровідності, але великі значення коефіцієнта ефективної в'язкості, тому для них характерні малі значення критерію Рейнольдса (набагато менші за одиницю). Водночас,

внаслідок великих значень коефіцієнта ефективної в'язкості, течія розплавів полімерів у каналах характеризується значним виділенням тепла дисипації, тому сили тертя в декілька раз перевищують масові й інерційні сили. Тепловий потік уздовж осі каналу, зумовлений теплопровідністю, малий порівняно з конвективним тепловим потоком. Як витікає з робіт [1–6], якщо температура внутрішньої стінки каналу екструдера лінійно зростає з певного значення довжини каналу, за рахунок внутрішнього тертя відбувається інтенсивний розігрів полімеру, зумовлений дисипацією і теплообміном зі стінкою. Біля стінки розігрів є найбільш інтенсивним. Величина дисипативного розігріву значною мірою залежить від тертя полімеру по стінці каналу, яке, у свою чергу, залежить від фазового стану, температури полімеру, його фізико-механічних властивостей і режиму руху [9]. Крім того, було встановлено [10], що внаслідок зменшення в'язкості полімеру біля стінки розігрів полімеру зконцентровано в області, яка прилягає до стінки, про що говорить максимум температури в цій зоні, у той час як температура стінки буде меншою. Це показує, що у разі вимі-

рювання температури розплаву полімеру поверхневими термопарами за великих швидкостей зсуву можна отримати велику помилку, оскільки максимум температури знаходиться на деякій відстані від стінки. Проте вимірювання температур у потоці полімеру ускладнене і не завжди можливе. Тому необхідно встановлювати певні еквівалентні величини температури, в'язкості та ін., залежні від матеріалу та параметрів процесу.

Крім того, процес плавлення полімеру у каналі переробного обладнання має великий вплив на пристінні ефекти, які можуть призводити до суттєвих нестабільностей течії розплаву та дефектів готових виробів [11–14].

Постановка задачі. Задачею досліджень, що проводяться, є експериментальне отримання залежності в'язкості суміші твердих часток полімеру в розплаві від концентрації, динаміки зміни концентрації твердих часток у розплаві та на їх основі – дослідження динаміки процесу плавлення.

Виклад основного матеріалу дослідження. *Експериментальна установка та методика досліджень.* Для вимірювання в'язкості полімеру та дослідження динаміки процесу плавлення була створена експериментальна установка на базі віскозиметра типу «конус – площина». Схема установки наведена на рис. 1. Вона складається зі станини 1, регулятора підняття ємності 2, підйомної плити 3, нагрівної ємності 4, ротора 5, індикатора годинникового типу 6, кулачкового патрона 7, редуктора 8 й електродвигуна 9.

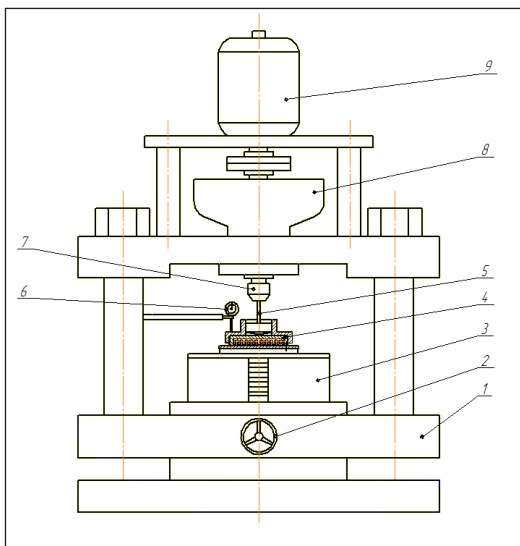


Рис. 1. Експериментальна установка

У свою чергу, нагрівна ємність, зображена на рис. 2, складається зі стола 1, на яку встановлено нерухому плиту 2 з нагрівними елементами 3, на

яку нагвинчується рухома плита 4, у яку встановлюється ротор 5 і термопара 6.

Температура підтримувалася за допомогою одноканального ПД-регулятора температури МікРа 600. Для зворотного зв'язку була використана хромель-алюмелева термопара. Переміщення нагрівної ємності, з якої вираховувалася зміна об'єму, фіксувалося за допомогою індикатора годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм. Швидкість обертання ротора вимірювалася за допомогою лазерного тахометра DT-2234С. Потужність, споживана електродвигуном, вимірювалася за допомогою лабораторного вимірювального комплексу К-50.

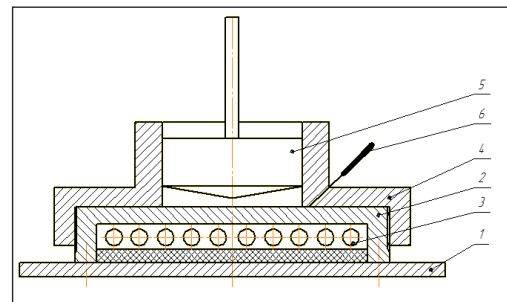


Рис. 2. Нагрівна ємність

Під час проведення натурного експерименту за допомогою терморегулятора нагрівалася ємність, у яку засипалися гранули полімеру, після чого ємність стискалася з постійним зусиллям, а полімер піддавався певній швидкості зсуву за допомогою ротора, закріпленого на електродвигуні. Фіксувалися такі параметри: зміна об'єму полімеру внаслідок плавлення (переміщенням нагрівної ємності), швидкість обертання ротора та потужність, споживана електродвигуном.

У ході експерименту було проведено ряд дослідів із різними гранульованими полімерними матеріалами за різних температур. Було використано такі матеріали:

1. Поліетилен високої густини марки 15803-020;
2. Поліетилен низької густини марки 10802-020;
3. Полістирол марки ПС-С-1-3.

Під час проведення експерименту вимірювалася частота обертання ротора (n , об/хв), потужність (N , Вт) і переміщення рухомої плити (δ , мм).

Крутний момент на роторі

$$M = \frac{9,549 \cdot N}{n} - M_0,$$

де M_0 – крутний момент холостого ходу, необхідний для подолання тертя між ротором і ємністю, встановлювався для кожної швидкості обертання попередніми вимірюваннями.

Кутова швидкість ротора

$$\dot{\epsilon} = 2\lambda \frac{n}{60}$$

Швидкість зсуву

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\epsilon}}{\tan \alpha}$$
,
 де α – кут конусності, $\alpha = 158$.

Напруження зсуву

$$\tau = \frac{3M}{2\pi R^3}$$

де R – радіус при основі конуса, $R = 22,5$ мм.
 В'язкість

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Під час проведення дослідів в установку засипався один і той самий об'єм полімеру – $1,5 \cdot 10^4$ мм³. Об'єм полімеру вираховувався із переміщення рухомої плити

$$V = \pi R^2 \left(h_0 - \delta - \frac{1}{3} h_k \right),$$

де h_0 – початкова відстань від ротора до площини, $h_0 = 11,44$ мм;

h_k – висота конусної частини, $h_k = 6,03$ мм.

Аналіз результатів досліджень. Для підтвердження адекватності отриманих даних було зроблено порівняння залежності в'язкості полістиролу ПС-С-1-3 від швидкості зсуву, отриманої під час експерименту з довідковими даними [15] (рис. 3).

Як видно з рис. 3, експериментальні дані лежать у межах довідкових залежностей, що свідчить про адекватність отриманих даних. Незначні відмінності у залежностях пов'язані з використанням різних марок полімерних матеріалів і відмінностями у методиці проведення досліджень.

У розрахунку в'язкості полімерного матеріалу було використано уточнену методику оброблення експериментальних даних капілярної віскозиметрії [16].

Обробка експериментальних даних дала змогу отримати графіки, що демонструють динаміку зміни об'єму гранульованого матеріалу внаслідок плавлення поліетилену високої густини (рис. 4), поліетилену низької густини (рис. 5) та полістиролу (рис. 6) за різних температур.

З рис. 4–6 можна зробити висновок, що, за винятком початкового періоду, об'єм із часом зменшується майже лінійно.

У кожній точці була обрахована в'язкість, завдяки чому були отримані графіки, що демонструють динаміку зміни в'язкості внаслідок плавлення поліети-

лену високої густини (рис. 7), поліетилену низької густини (рис. 8) та полістиролу (рис. 9) за різних температур.

Рис. 7–9 демонструють, що після досягнення деякої товщини півки розплаву на роторі, що характеризується максимумом на графіках, в'язкість суміші зменшується, а потім стабілізується на величині, яка відповідає в'язкості розплаву. Проведені дослідження дозволять обґрунтувати коефіцієнти стиснення та геометрію зони плавлення черв'яків екструдерів для перероблення різних термопластів.

Висновки. Створено установку для дослідження процесу плавлення гранульованих термопластів із використанням віскозиметра типу «конус-площина».

Запропоновано методику проведення експериментальних досліджень процесу плавлення гранульованих термопластів.

Експериментально досліджено динаміку зміни частки твердої фази в суміші гранульованих термопластів із розплавом. Результати досліджень різних полімерів показали, що, за винятком початкового періоду розігріву, об'єм суміші з часом зменшується майже лінійно.

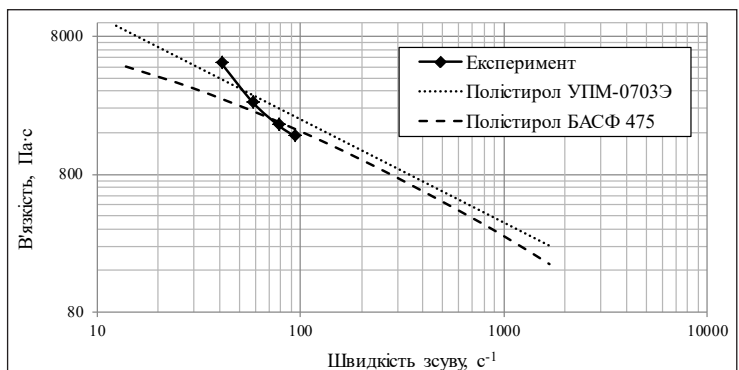


Рис. 3. Порівняння залежності в'язкості від швидкості зсуву

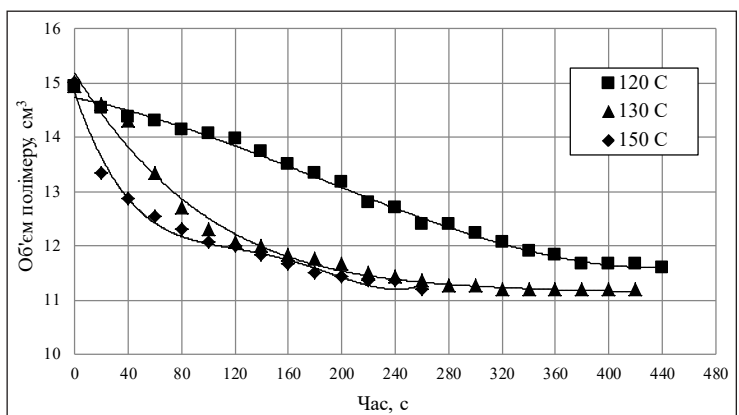


Рис. 4. Динаміка зміни об'єму гранульованого поліетилену високої густини

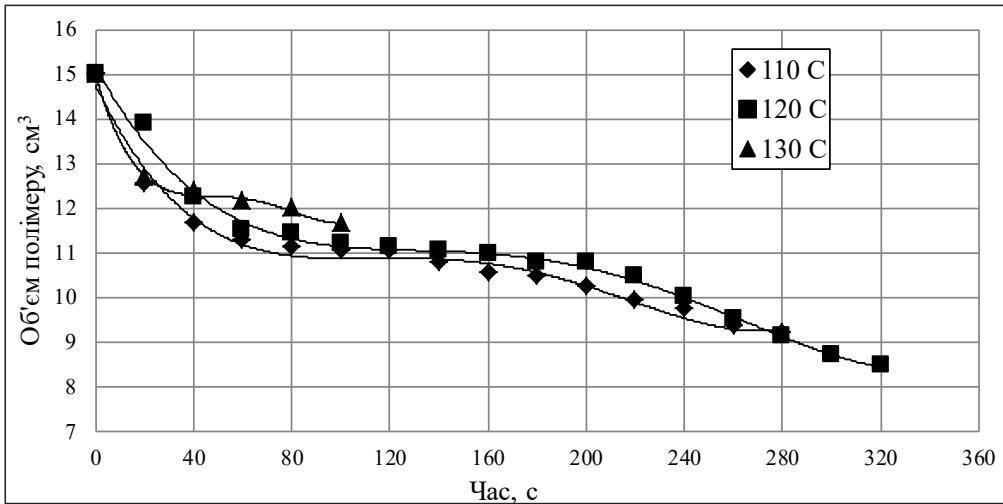


Рис. 5. Динаміка зміни об'єму гранульованого поліетилену низької густини

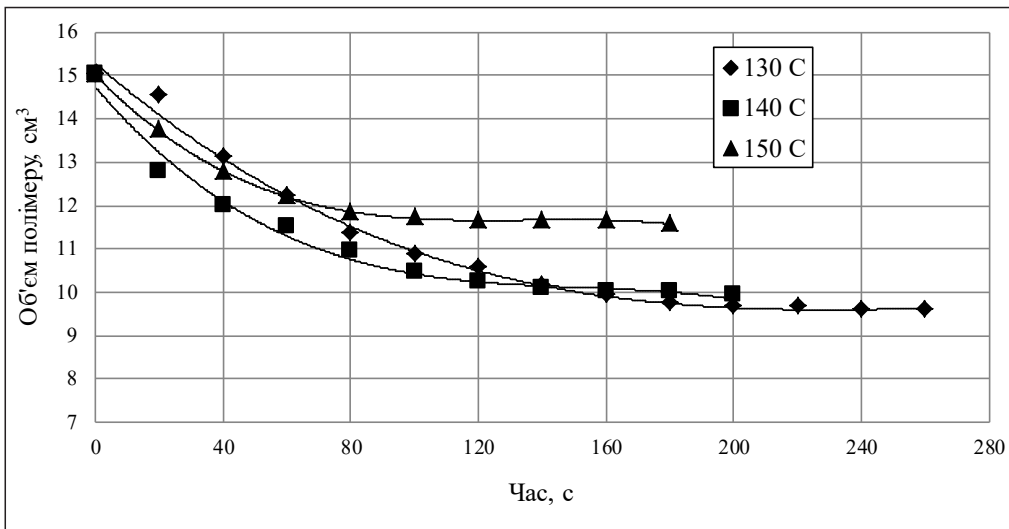


Рис. 6. Динаміка зміни об'єму гранульованого полістиролу

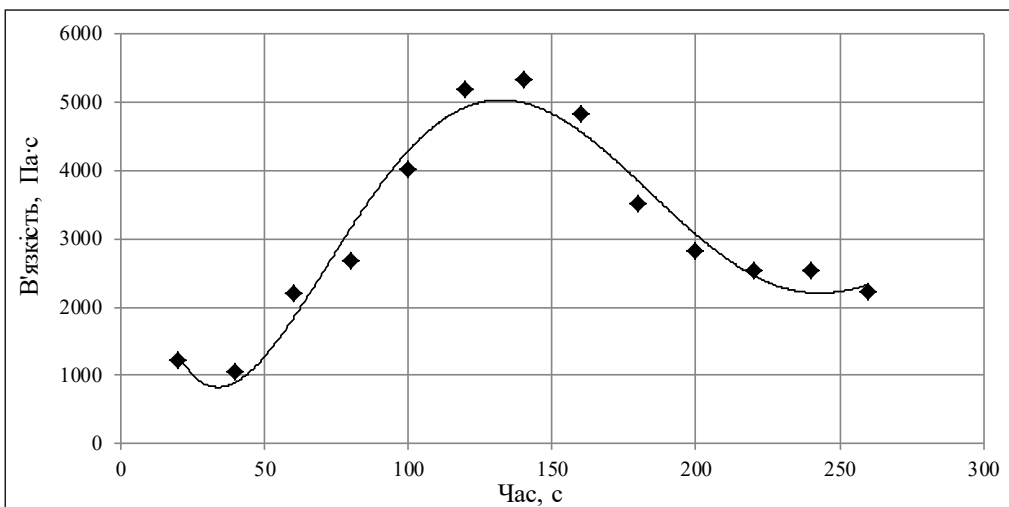


Рис. 7. Динаміка зміни в'язкості поліетилену високої густини за температури 140°C

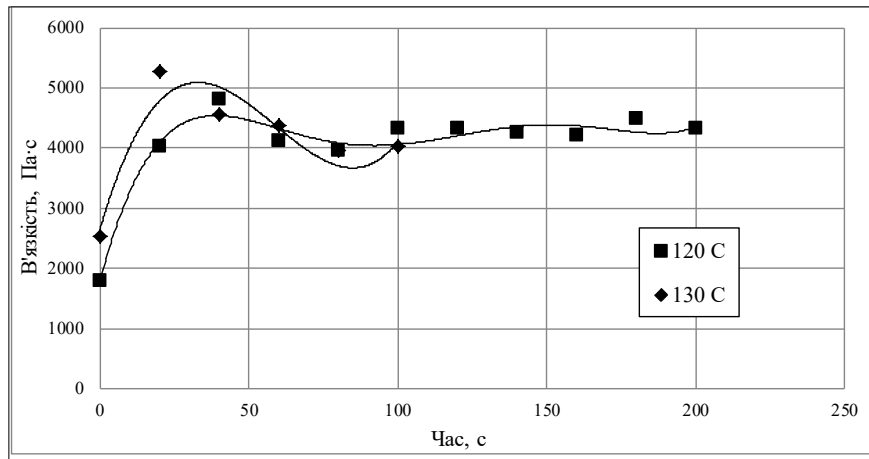


Рис. 8. Динаміка зміни в'язкості поліетилену низької густини

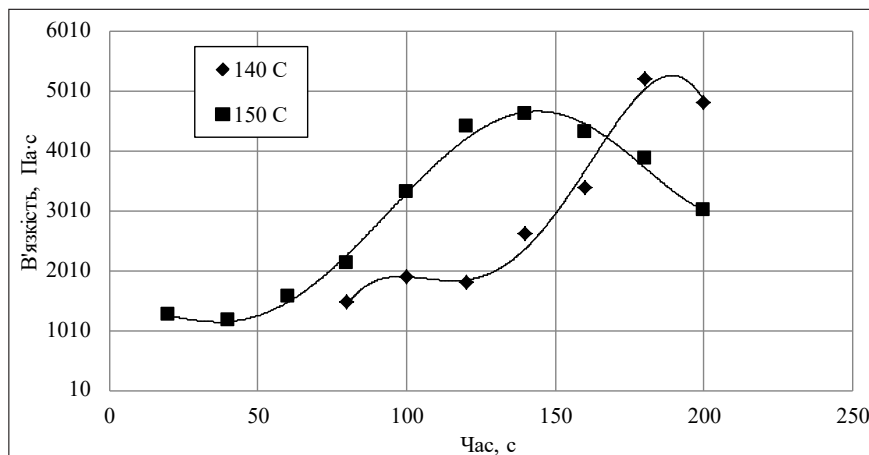


Рис. 9. Динаміка зміни в'язкості полістиролу

Досліджено залежності в'язкості суміші твердих часток полімеру в розплаві від їх концентрації. Встановлено, що для різних полімерів за

певних температурно-деформаційних режимів спостерігається максимум ефективної в'язкості суміші твердих часток із розплавом.

Список літератури:

1. Шишлянников В.В. Исследование теплообмена при течении расплавов полимеров в круглых трубах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: Волгоград, 1974. 21 с.
2. Яхно О.М., Пищенко Л.А., Степаненко Т.С., Кривошеев В.С. Об особенностях течения резиновых смесей в цилиндрическом канале. Химическое машиностроение. 1978. Вып. 28. С. 25–29.
3. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров. Москва: Химия, 1977. 461 с.
4. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров / пер. с англ. Москва: Химия, 1984. 632 с.
5. Радченко Л.Б. Переробка термопластів методом екструзії. Київ: ІЗМН, 1999. 220 с.
6. Zehev Tadmor, Costas G. Gogos. Principles of polymer processing. A JohnWiley&Sons, 2006. 964 p.
7. Ivitskiy I.I., Sokolskiy O.L., Kurilenko V.M. Simulation of Intelligent Sensors Dipping Into the Melting Polymer Composite. Technology Audit and Production Reserves. 2016. Vol. 5. № 3 (31). P. 22–26. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.81236.
8. Ivitskiy I., Sivetskiy V., Bazhenov V., Ivitska D. Modeling the Electrostatic Control Over Depth of the Introduction of Intelligent Sensors into a Polymer Composite Material. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 1. № 5 (85). P. 4–9. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.91659.
9. Сівецький В.І., Сахаров О.С., Сокольський О.Л., Рябінін Д.Д. Пристинні ефекти в процесах переробки полімерних матеріалів. Київ: Січка, 2009. 140 с.

10. Сахаров О.С., Сівецький В.І., Сокольський О.Л. Дослідження плавлення полімеру в каналі черв'ячного екструдера. Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження». 2012. № 1 (9). С. 63–67.
11. Сокольський О.Л., Івіцький І.І., Сівецький В.І., Мікульонок І.О. Визначення в'язкості пристінного шару у формуючих каналах обладнання для переробки полімерів. Наукові вісті НТУУ «КПІ». 2014. № 2 (94). С. 66–69.
12. Сокольський О.Л., Сівецький В.І., Мікульонок І.О., Івіцький І.І. Числове моделювання впливу пристінного шару на процес течії полімеру в переробному обладнанні. Хімічна промисловість України. 2013. № 6. С. 34–37.
13. Ivitskyi I.I. Polymer Wall Slip Modelling. Technology Audit and Production Reserves. 2014. Vol. 5. № 3 (19). P. 8–11. DOI: 10.15587/2312-8372.2014.27927.
14. Sokolskyi A.L., Ivitskyi I.I. Method of Accounting Wall Slip Polymer in Modeling Channel Processing Equipment. Modern Scientific Research and their Practical application. 2014. Vol. J21410. P. 137–140.
15. Пахаренко В.А., Привалко В.П., Петрушенко Е.Ф. Теплофизические и реологические характеристики полимеров: Справочник / под ред. Ю.С. Липатова. Киев: Наукова думка, 1977. 17 с.
16. Двойнос Я.Г., Сокольський О.Л., Івіцький І.І. Уточнена методика оброблення експериментальних даних капілярної віскозиметрії. Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2015. № 1 (14). С. 51–54. DOI: 10.20535/2306-1626.1.2015.52311.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПЛАВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРА

На базе вискозиметра типа «конус-плоскость» создана установка для исследования процесса плавления гранулированных термопластов. Предложена методика проведения экспериментальных исследований. Экспериментально исследована динамика изменения доли твердой фазы в смеси гранулированных термопластов с расплавом. Исследованы зависимости вязкости смеси твердых частиц полимера в расплаве от их концентрации. Установлено, что для различных полимеров при определенных температурно-деформационных режимах наблюдается максимум эффективной вязкости смеси твердых частиц с расплавом.

Ключевые слова: исследование, плавления, вискозиметру, вязкость, термопласт.

EXPERIMENTAL STUDY OF POLYMER MELTING PROCESS

On the basis of a cone-plane type viscometer, an installation for studying the melting process of granular thermoplastics has been developed. A technique for carrying out experimental studies is proposed. Change dynamics in the fraction of the solid phase in a mixture of granular thermoplastics with a melt is studied experimentally. The dependence of the mixture viscosity of polymer solid particles in the melt on their concentration was studied. It is established that for various polymers under certain temperature-deformation regimes, the maximum effective viscosity of solid particles with a melt is observed.

Key words: research, melting, viscosimetry, viscosity, thermoplastics.

Котречко О.О.

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ И УДАРНОЙ МИКРОТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ

Разработаны методы определения статической и ударной микротвердости металлов и их сплавов с использованием инденторов новых конструкций, выполненных в виде четырехгранной пирамиды с углами между гранями $\alpha = 90^\circ$ и трехгранной пирамиды с углами при ее вершине $\alpha = 105^\circ$ соответственно, которые обеспечивают в процессе испытаний переход от упругих деформаций к пластическим при меньших значениях величины наклепа. Показатели статической и ударной микротвердости металлов и их сплавов, полученные при исследованиях по предложенным методам, являются более точными по сравнению с существующими стандартными по Кнупу и Виккерсу. Их использование целесообразно для расчета оптимальных размеров и геометрии готовых деталей. Новизна разработанных и предложенных методов подтверждена патентами Украины.

Ключевые слова: металлы, статическая и ударная микротвердость, индентор, пирамида.

Постановка проблемы. Микротвердость поверхностных слоев металлических изделий после химико-термической обработки, лазерной и плазменной наплавки, металлизации и т. п. связана с их износостойкостью, усталостной прочностью, а также надежностью и долговечностью работы готовых изделий. Поэтому для сравнительной оценки отдельно взятых упрочняющих видов обработки металлов и их сплавов целесообразна разработка новых методов определения достоверных значений микротвердости.

Постановка задания. Главной целью работы является повышение точности определения статической и ударной микротвердости металлов и их сплавов за счет разработки новых конструкций инденторов, которые обеспечивают в процессе их вжатия в исследуемое изделие переход от упругих деформаций к пластическим при меньших значениях величин наклепа металла.

Изложение основного материала исследования. Определение статической микротвердости металлов и их сплавов. Известны методы определения статической микротвердости металлов по Кнупу и Виккерсу. Первый и наиболее распространенный метод определения микротвердости по Кнупу [1] был разработан Национальным бюро стандартов Соединенных Штатов Америки (далее – США) в 1939 г. При исследованиях по этому методу используют ромбически-пирамидальный индентор с углами между гранями $172^\circ 30'$ и 130° .

Число твердости по Кнупу составляет:

$$HK = P/0,7028 d^2, \text{ Н/мм}^2,$$

где P – приложенная к образцу нагрузка, H, d – длина длинной диагонали отпечатка, мм.

Недостатком метода Кнупа является то, что отношение глубины отпечатка (h) к длине его большей диагонали (d) составляет примерно $\frac{h}{d} = \frac{1}{30}$, из-за чего в большинстве случаев отпечатки не всегда симметричны, а при их измерении возможны погрешности.

Существующий стандартный метод определения микротвердости металлов по Виккерсу [2] предполагает использование при испытаниях правильной четырехгранной пирамиды с углом между противоположными гранями при вершине $\alpha = 136^\circ$.

Значение микротвердости по Виккерсу рассчитывают по формуле:

$$HV_\mu = 1,8544 \cdot \frac{P}{d^2}, \text{ кН/мм}^2,$$

где P – приложенная к образцу нагрузка, кН; d – среднее арифметическое значение длин двух диагоналей отпечатка пирамиды, мм.

Известно, что вдавливание индентора в металл сопровождается его наклепом [3]. При этом сопротивление проникновению индентора в образец постоянно возрастает и зависит от его геометрии, а полученные значения твердости превышают действительные.

Проведенный анализ существующих стандартных методов определения статической микро-

твердости металлов и их сплавов свидетельствует о необходимости разработки новых конструкций инденторов, которые обеспечат переход от упругих к пластическим деформациям при меньших значениях величины наклепа.

Для определения статической твердости металлов разработана и предлагается конструкция индентора [4] в форме правильной четырехгранной пирамиды с углом при вершине $\alpha = 90^\circ$ (рис. 1).

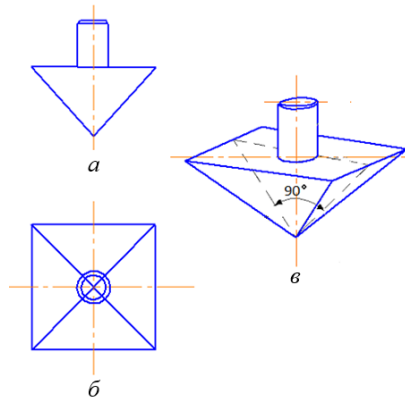


Рис. 1. Конструкция индентора, а и б – соответственно фронтальная и горизонтальная проекции, в – общий вид

Метод расчета статической микротвердости металлов и их сплавов [5] основан на измерении средних арифметических значений двух диагоналей (d_1 и d_2) отпечатка 1 пирамиды 2 в исследуемом изделии 3, полученного от ее вдавливания в образец (рис. 2).

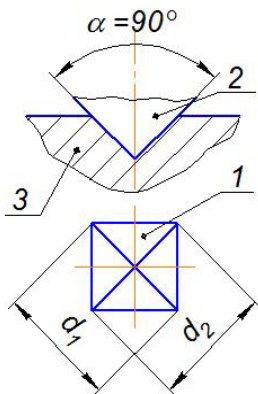


Рис. 2. Схема измерения отпечатка пирамиды. Значение статической микротвердости (HK_μ) определяют отношением нагрузки (P) к площади отпечатка (F) пирамиды, то есть:

$$HK_\mu = \frac{P}{F}, \text{ кН / мм}^2.$$

Площадь полученного отпечатка рассчитывается по формуле:

$$F = \frac{d^2}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{d^2}{1,4142}, \text{ мм}^2,$$

где d – среднее арифметическое значение длин двух диагоналей отпечатка пирамиды мм; α – угол между противоположными гранями при вершине пирамиды, $\alpha = 90^\circ$.

Тогда статическая микротвердость будет равна:

$$HK_\mu = 1,4142 \frac{P}{d^2}, \text{ кН / мм}^2.$$

Определение ударной микротвердости металлов и их сплавов. При определении ударной микротвердости металлов и их сплавов [6] используют в качестве индентора правильную трехгранную пирамиду с углом при вершине $\alpha = 105^\circ$ (рис. 3).

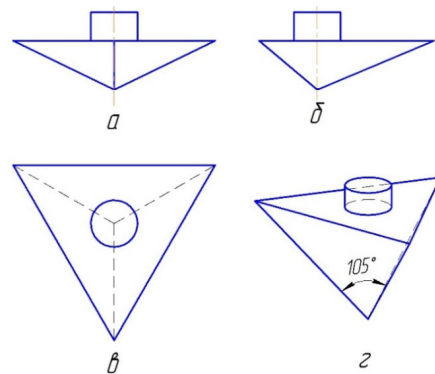


Рис. 3. Конструкция трехгранной пирамиды, а, б и в – фронтальная профильная и горизонтальная проекции индентора соответственно; г – общий вид

Преимущество предлагаемой правильной трехгранной пирамиды по сравнению с известными заключается в том, что она имеет более острую вершину и в процессе испытаний переход от упругих деформаций к пластическим происходит при меньших значениях величин наклепа при одинаковой глубине ее вжатия в металл.

Схема измерения глубины отпечатка, полученного во время ударной нагрузки, представлена на рис. 4.

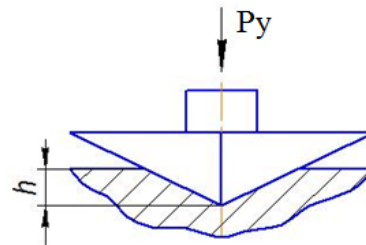


Рис. 4. Схема измерения отпечатка пирамиды

Значение ударной микротвердости металлов и их сплавов определяют по формуле:

$HK_\mu = \frac{P_y}{F}, \text{ кН/мм}^2$, где P_y – величина прилагаемой ударной нагрузки, кН; F – площадь отпечатка индентора, мм^2 .

Площадь полученного отпечатка трехгранной пирамиды с углом при вершине $\alpha = 105^\circ$ составляет:

$$F = 9h^2, \text{ мм}^2,$$

где h – глубина отпечатка, мм.

Тогда ударная микротвердость будет равна:

$$HK_{\mu} = \frac{P_y}{9h^2}, \text{ кН/мм}^2.$$

Выводы. Использование предложенных конструкций инденторов уменьшает величину наклепа в процессе их вдавливания в металл, в результате чего показатели значений статической и ударной микротвердости, полученные разрабо-

танными методами, являются более точными по сравнению с используемыми стандартными по Кнупу и Виккерсу. Для разработки оптимальных размеров и геометрии готовых изделий и обеспечения их надежности и долговечности целесообразно применение разработанных методов определения статической и ударной микротвердости металлов при исследованиях достоверных механических свойств целесообразно, которое может быть рекомендовано заводским и конструкторским бюро машиностроительных отраслей.

Список литературы:

1. Knoop F., Peters Ch.G., Emerson W.G.I. Bur. Standarts. 1939. V. 23, № 1. National Bureau of the United States.
2. ГОСТ 2999–75, СТ СЭВ 470–77. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу. Metals and alloys. Vickers hardness test by diamond pyramid.
3. Werkstoffprüfung von Metallen. Von einem Autorenkollektiv Federführung / Dr. Karl Nitzsche. Veb Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Leipzig. 1963.
4. Испытания металлов: сборник статей / под ред. К. Нитцше. Перевод с нем. Е. Лайнер и др. М.: Металлургия, 1967. 452 с.
5. Патент Украины № 104631. Бюл. №3 от 10 февраля 2016 г. Индентор для определения микротвердости металлов и их сплавов по Котречку.
6. Патент Украины № 103685. Бюл. № 24 от 25 декабря 2015 г. Способ определения микротвердости металлов и их сплавов по Котречку.
7. Патент Украины № 110576. Бюл. № 10 от 10 октября 2016 г. Метод определения ударной твердости металлов и их сплавов по Котречку.

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ СТАТИЧНОЇ ТА УДАРНОЇ МІКРОТВЕРДОСТІ МЕТАЛІВ ТА ЇХ СПЛАВІВ

Розроблено методи визначення статичної й ударної микротвердості металів та їх сплавів із використанням індентора нових конструкцій, виконаних у вигляді чотиригранної піраміди з кутами між гранями $\alpha = 90^\circ$ і тригранної піраміди з кутами при її вершині $\alpha = 105^\circ$, які забезпечують у процесі випробувань перехід від пружних деформацій до пластичних за менших значень величини наклепу. Показники статичної і ударної микротвердості металів та їх сплавів, отримані під час досліджень запропонованими методами, є більш точними порівняно з наявними стандартними за Кнупом і Віккерсом. Їх використання ядочільне для розрахунку оптимальних розмірів і геометрії готових деталей. Новизна розроблених і запропонованих методів підтверджена патентами України.

Ключові слова: метали, статична і ударна микротвердість, індентор, піраміда.

METHODS FOR THE DETERMINATION OF STATIC AND PERCUSSIONS MICROHARDNESS OF METALS AND THEIR ALLOYS

Methods have been developed for determining the static and shock microhardness of metals and their alloys using indentors of new structures made in the form of a tetrahedral pyramid with corners between the faces $\alpha = 90^\circ$ and a triangular pyramid with corners at its apex $\alpha = 105^\circ$, which ensure the transition from elastic deformations to plastic ones at smaller values of plastic hardening. Values of static and shock microhardness of metals and their alloys obtained in the studies by the proposed methods are more accurate than the existing standard Knoop and Vickers. Their use is useful for calculating the optimal dimensions and geometry of finished parts. The novelty of the developed and proposed methods is confirmed by the patents of Ukraine.

Key words: metals, static and percussions microhardness, indenter, pyramid.

УДК 678.057

Сокольський О.Л.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Герасименко Ю.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Кушнір М.С.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ПЛАВЛЕННЯ ПОЛІМЕРНОГО ПРУТКА В ПРОЦЕСІ ЗВАРЮВАННЯ ПРИСАДКОВИМ МАТЕРІАЛОМ

Складено математичну модель процесу плавлення полімерного прутка в пристроях для зварювання розплавом. Запропоновано вдосконалену конструкцію пристрою для зварювання розплавом. Виконано числове моделювання процесу плавлення для традиційної й удосконаленої конструкцій. Встановлено розподіл тиску на вході в канал і температури на виході з нього для різних швидкостей подачі прутка. Підтверджено енергетичну ефективність запропонованої конструкції порівняно з наявними.

Ключові слова: плавлення, полімер, зварювання, присадковий матеріал, моделювання.

Постановка проблеми. Зварювання пластмас – технологічний процес отримання нероз’ємного з’єднання елементів конструкції упаковки за допомогою хімічної або дифузійно-реологічної взаємодії макромолекул полімерів.

Останнім часом набуває поширення зварювання розплавом (присадковим полімерним матеріалом) завдяки простоті, високій продуктивності, широким технологічним можливостям та високій якості зварних з’єднань. Метод зварювання присадковим полімерним матеріалом заснований на використанні теплоти розплавленого присадкового матеріалу, що подається між поверхнями, що з’єднуються. Проте для досягнення високої якості з’єднання необхідно забезпечити якісну підготовку розплавленого присадкового матеріалу за мінімальних затрат енергії та часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зварювання присадковим полімерним матеріалом може проводитися за безперервною та періодичною схемами [1]. За безперервною схемою зварювання присадковий полімерний матеріал виходить із нагрівального циліндра безперервно, а в разі виконання процесу за періодичною схемою періодично надходить у зазор між деталями, які

встановлені в форму або затиснуті в спеціальному пристосуванні. Зварювання розплавом доцільно здійснювати за високих швидкостей подачі розплаву до зони з’єднання і максимальної його маси, оскільки присадковий полімерний матеріал втрачатиме менше теплоти і нагрівати його можна до більш низьких температур.

Щоб забезпечити процес зварювання, розплавлений матеріал, що подається в зону з’єднання, повинен мати температуру на 40–80°C вищу за температуру текучості полімеру [2].

Зварювання розплавом можна виконувати у два способи: екструзійним зварюванням і зварюванням розплавленим прутком.

Екструзійне зварювання. У такий спосіб зварюють стикові або нахлесточні з’єднання деталей великої довжини з використанням екструдованого присадкового матеріалу. За найбільш типовою схемою, присадний матеріал безперервно надходить з екструдера в зону з’єднання, де віддає своє тепло поверхням, що підлягають з’єднанню, і разом із з’єднаними деталями проходить між обтискними роликками (рис. 1) [3].

Присадковий матеріал зазвичай має круглий переріз. Розміри перерізу прутка є одним із

чинників, що визначають розподіл температур у присадковому матеріалі. Попередній підігрів поверхонь елементів, що зварюються, дозволяє на 20–30°C знизити температуру присадкового матеріалу порівняно зі зварюванням без попереднього підігріву поверхонь, що з'єднуються. Температура присадкового матеріалу, за якої забезпечується максимальна міцність з'єднань, залежить від величини тиску зварювання (з пониженням тиску температура присадкового матеріалу повинна підвищуватися, однак для кожного полімеру характерний свій інтервал температур присадкового матеріалу, за межами якого забезпечити максимальну міцність з'єднань неможливо).

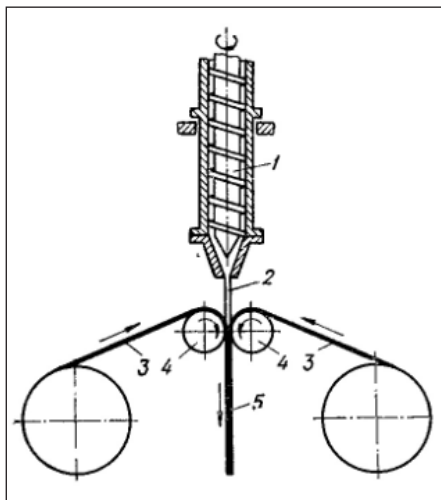


Рис. 1. Екструзійне зварювання: 1 – екструдер, 2 – розплавлений присадковий матеріал; 3 – рулони пакувального матеріалу; 4 – притискні ролики; 5 – зварений матеріал

Зварювання розплавленим прутком. За технологічними параметрами зварювання розплавленим прутком і виконується із застосуванням нагрівальних пристроїв прямого типу, а присадковий матеріал у вигляді прутка змотується з бухти і за допомогою роликів безперервно подається в нагрівальний циліндр, звідки розплавлений матеріал видавлюється на кромки деталей, що з'єднуються (рис. 2).

Для покращення процесу зварювання розплавом присадкового полімерного матеріалу запропоновано вдосконалена конструкцію пристрою для зварювання розплавом із трубчастим прутком і соплом із внутрішнім дорном [4].

Удосконалена конструкція дозволяє пришвидшити процес нагрівання та зробити більш рівномірним розподіл температур завдяки двосторонньому нагріванню прутка, а також дає можливість регулювати подачу розплаву.

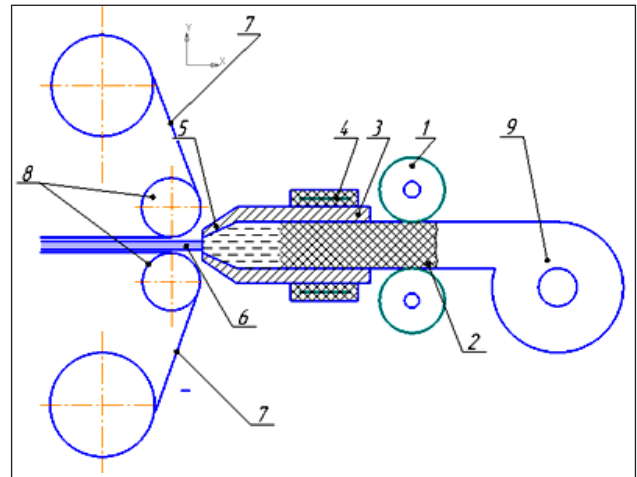


Рис. 2. Схема зварювання розплавленим прутком: 1 – подавальний механізм; 2 – полімерний пруток; 3 – канал для плавлення полімерного прутка; 4 – нагрівальний блок; 5 – сопло; 6 – розплав полімеру; 7 – рулони пакувального матеріалу; 8 – притискні ролики; 9 – бухта

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження впливу геометричних параметрів і технологічних режимів на енергетичні затрати й розподіл температур у полімерному присадковому матеріалі, а також обґрунтування їхніх раціональних значень.

Виклад основного матеріалу дослідження. Загальна математична модель процесу. Проблема потоку рідини визначається законами збереження маси, імпульсу й енергії. Ці закони виражаються в термінах диференціальних рівнянь із частковими похідними, які дискретизуються з використанням методу на основі кінцевих елементів. Оскільки форма розрахункової області є циліндричною, рівняння доцільно розглядати в циліндричних координатах [5, с. 88–96].

Із закону збереження масового закону випливає рівняння нерозривності:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r \cdot v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \Theta} (\rho v_\Theta) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z) = 0,$$

де v_r , v_Θ і v_z – компоненти вектора швидкості в напрямках r , Θ і z відповідно; ρ – густина; r , Θ і z – координати в циліндричній системі; t – час.

Для нестисливої рідини $\rho = \text{const}$, тому рівняння нерозривності запишеться у вигляді:

$$-\rho \operatorname{div}(v) = 0.$$

Рівняння руху в циліндричних координатах:

Проекція на напрям r :

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\Theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \Theta} - \frac{v_\Theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r \sigma_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\Theta}}{\partial \Theta} - \frac{\sigma_{\Theta\Theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g_r$$

Проекція на напрям Θ :

$$\rho \left(\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_\theta^2}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial r} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r\sigma_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\sigma_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial\tau_{rz}}{\partial z} \right) + \rho g_r$$

Проекція на напрям z:

$$\rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(r\tau_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial\tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial\sigma_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z$$

У лівій частині рівнянь перший складник являє собою сили інерції, що зв'язані зі зміною швидкості в даній точці (локальні), а інші складники – сили інерції, зв'язані зі зміною швидкості в просторі (конвективні). У правій частині рівнянь записана сума сил тиску і в'язкості. Рівняння руху може бути спрощене шляхом виключення членів, що враховують інерційні, конвективні і масові сили внаслідок малості останніх порівняно із силами тертя під час течії полімерів, що відрізняються високою в'язкістю.

Дане рівняння для випадку стисливої рідини, нехтуючи роботою сил в'язкості та тиску, в'язкою дисипацією і кінетичною енергією:

$$\rho C \frac{DT}{Dt} = -(\nabla q) - (\tau : \nabla v) - T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right) \times (\nabla \cdot v),$$

де q – тепловий потік, що визначається за законом Фур'є: $q = -\lambda \nabla T$; C_p – питома теплоємність; λ – коефіцієнт теплопровідності; T – абсолютна діюча температура.

Для замикання системи рівнянь необхідне ще й рівняння стану.

Для рідин рівнянням стану є залежність напруження зсуву від швидкості деформації (швидкості зсуву):

$$\tau_{rz} = \eta \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right), \quad \tau_{r\theta} = \eta \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} \right],$$

$$\tau_{z\theta} = \eta \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} \right).$$

Для речовин, які не підкорюються ньютонівському закону, в'язкість не є сталою величиною. Її залежність від умов течії можна описати степеневим законом.

Степеневий закон з урахуванням температурної залежності в'язкості для різних класів рідин має вигляд:

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = K (\lambda \dot{\gamma})^{n-1} H(T),$$

де K – величина середньої в'язкості рідини, Па·с; λ – період релаксації, с; $\dot{\gamma}$ – другий інваріант \mathbf{D} , с⁻¹; n – показник ступеня, який визначає клас рідини (згідно з фізичною моделлю $n < 1$, оскільки матеріал належить до класу псевдопластиків); $H(T) = \exp \left[\frac{E_a}{RT_a} \left(\frac{1}{T - T_0} - \frac{1}{T_a - T_0} \right) \right]$;

E_a – енергія активації течії, Дж/моль; R – газова стала, Дж/(моль·К); T_a – абсолютна температура активації, К; T_0 – абсолютна температура відліку, К.

Розглянемо розплав полімеру під дією перепаду тиску уздовж осі каналу Oz із радіусом R і довжиною l ($l/d > 10$). Тиск на вході в канал дорівнює p , а на виході – p_0 . Оскільки течія усталена, то приймаємо, що $\partial p / \partial z = \text{const}$, тобто початкова вхідна ділянка каналу не розглядається.

Перепади тиску за іншими координатами дорівнюють нулю:

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} = \frac{\partial p}{\partial r} = 0.$$

Отже, швидкості і напруження зсуву також дорівнюють нулю:

$$v_r = v_\theta = 0; \quad \tau_{r\theta} = 0; \quad \tau_{\theta z} = 0.$$

Оскільки течія розплаву усталена, то швидкість уздовж осі z і в часі не змінюється:

$$\frac{\partial v_z}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial v_z}{\partial t} = 0.$$

Гравітаційні сили не враховуємо, оскільки вони набагато менше сил, зумовлених напруженням зсуву, тому:

$$\rho g_r = \rho g_\theta = \rho g_z = 0.$$

Інерційні сили дорівнюють нулю:

$$\rho \frac{dv}{dr} = \rho \frac{dv}{d\theta} = \rho \frac{dv}{dz} = 0.$$

Початкові та граничні умови:

$$\partial T / \partial r = 0; \quad \partial v_z / \partial r = 0 \quad \text{при } r = 0;$$

$$T = T_0 = T_{cm}; \quad \partial T / \partial r = 0 \quad \text{при } z = 0.$$

Умова ковзання (тертя) визначається залежно від температури:

$$\dot{\mathbf{A}}_s = -F_{\text{slip}}(T) v_s, \quad \text{за умови } T < T_{\text{fluid}};$$

$$v_s = 0, \quad \text{за умови } T \geq T_{\text{fluid}},$$

де v_s – тангенціальна швидкість рідини; F_{slip} – параметр матеріалу.

Температурна залежність:

$$H(T) = \exp \left[\frac{\alpha}{T - T_0} - \frac{\alpha}{T_a - T_0} \right].$$

Рівняння збереження енергії для даного випадку набуває вигляду:

$$\frac{\lambda}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \varepsilon v_z \frac{\partial P}{\partial z} + k \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^{n+1} = 0,$$

де ε – коефіцієнт стисливості; k – коефіцієнт консистенції.

Числове моделювання процесу. Проведено серію числових експериментів для запропонованої конструкції за різних швидкостей подачі. Густина сіткової області для всіх дослідів підбиралася з умови збіжності температури на виході порівняно з попередньою в межах 1 К.

Приклад розподілу тиску (а) та температури (б) у присадковому матеріалі за діаметру дорна

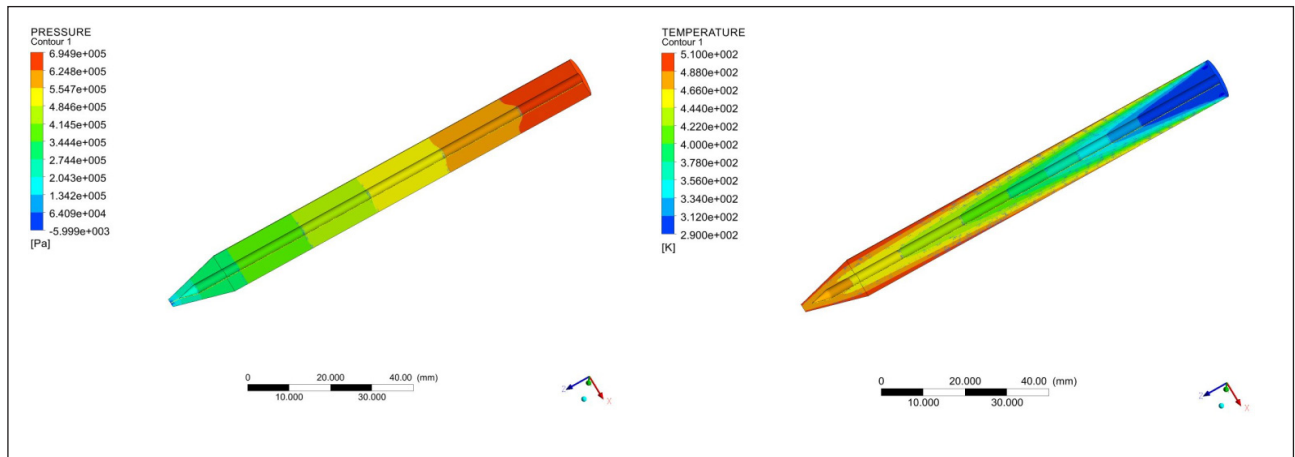


Рис. 3. Розподіл тиску (а) та температури (б) у присадковому матеріалі за діаметра дорна 2,5 мм

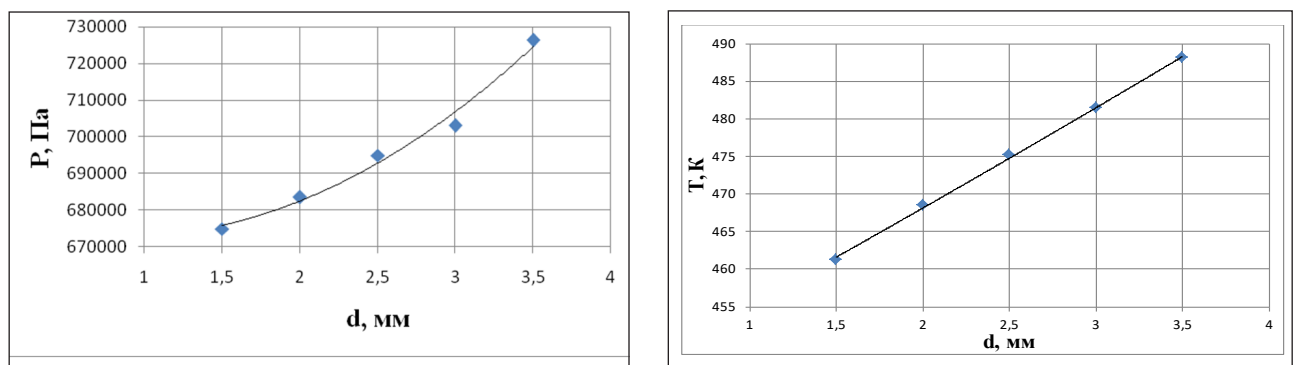


Рис. 4. Залежність тиску на вході в нагрівний канал (а) та температури на виході із сопла (б) від діаметра дорна

2,5 мм та вхідної швидкості 4 мм/с показано на рис. 3, а залежність тиску на вході в нагрівний канал (а) та температури на виході із сопла (б) від діаметра дорна – на рис. 4.

З рис. 3 а видно, що градієнт тиску майже постійний по довжині каналу й рівномірний по радіусу, тоді як плавлення матеріалу в основному відбувається ззовні (рис. 3 б), а його температурна гомогенізація – у проміжку між дорном і виходом із сопла.

Рис. 4 а, б показує майже лінійне зростання необхідного тиску для просування присадкового матеріалу та температури на виході із сопла зі збільшенням діаметру дорна. Причому зі збільшенням внутрішнього діаметра від 1,5 мм до 3,5 мм збільшення тиску є незначним (7,5%), а підвищення температури розплаву становить майже 25°C, що показує вищу ефективність плавлення за цієї геометрії. Подальше збільшення внутрішнього діаметра отвору може бути недоцільним внаслідок зменшення жорсткості полімерного стрижня під час його просування в нагрівному каналі.

На рис. 5 показано змодельований розподіл температур розплаву по довжині сопла від переходу із циліндричного каналу до виходу для різних кутів загострення дорна. Кут загострення сопла в усіх випадках становив 15°.

З рис. 5 випливає, що максимум температури досягається завдяки дисипації в місці з найменшою площею перерізу між дорном і соплом. Найдоцільнішою геометрією з міркувань однорідності температур та енергетичних витрат є така, де кут дорна й сопла становить 15°.

Найбільш доцільною температурою розплаву на виході із сопла є 450К. Розрахунки показують, що такої температури за традиційної конструкції можна досягти за швидкості подачі 3,6 мм/с, а для запропонованої конструкції з діаметром дорна 2,5 мм – 4 мм/с. Для першого випадку необхідна витрата потужності на подачу матеріалу становить 0,266 Вт, а для другого – 0,213 Вт, тобто на 16% менше. Потужність нагрівачів вважалась однаковою. Результати моделювання доводять доцільність застосування запропонованої

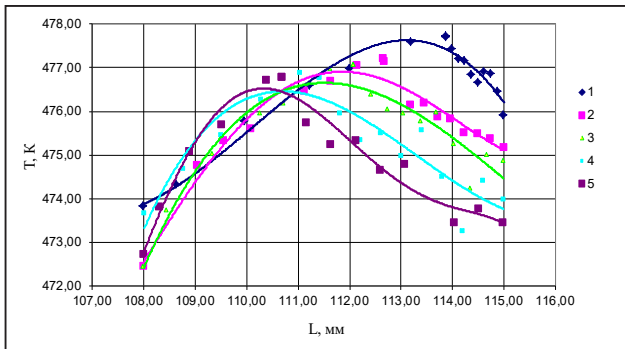


Рис. 5. Розподіл температури по довжині сопла для різних кутів загострення дорна α :
 1 – $\alpha=12^\circ$; 2 – $\alpha=15^\circ$; 3 – $\alpha=17^\circ$; 4 – $\alpha=20^\circ$; 5 – $\alpha=25^\circ$

конструкції пристрою для зварювання розплавом.

Висновки. Складено математичну модель процесу плавлення полімерного прутка в пристроях

для зварювання розплавом. Сформульовано початкові та граничні умови для застосування в числовому моделюванні.

Запропоновано вдосконалену конструкцію пристрою для зварювання розплавом із трубчастим прутком і соплом із внутрішнім дорном.

Виконано числове моделювання процесу плавлення для традиційної й удосконаленої конструкцій. Встановлено розподіл тиску на вході в канал та температури на виході із нього для різних швидкостей подачі прутка. Враховано дисипативні ефекти під час просування полімерного матеріалу в каналі в твердому та розплавленому станах.

Визначено доцільні геометричні параметри пристрою зварювання та технологічні параметри процесу. Підтверджено енергетичну ефективність запропонованої конструкції порівняно з наявними.

Список літератури:

1. Шестопад А.Н., Васильев Ю.С., Минеев Э.А. и др. Справочник по сварке и склеиванию пластмасс. Киев: Техника, 1986. 192 с.
2. Зайцев К.И., Мацюк Л.Н. Сварка пластмасс. Москва: Машиностроение, 1978. 222 с.
3. Тростянская Е.Б., Комаров Г.В., Шишкин В.А. Сварка пластмасс. Москва: Машиностроение, 1967. 252 с.
4. Пристрій для нанесення термоклею: Патент № 117252. Україна. № у 201612809, заявл. 16 грудня 2016 р.; опубл. 26 червня 2017 р. Бюл. № 12/2017.
5. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов). Москва: Химия, 1977. 464 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАВЛЕНИЯ ПОЛИМЕРНОГО ПРУТКА В ПРОЦЕССЕ СВАРКИ ПРИСАДОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ

Составлена математическая модель процесса плавления полимерного прутка в устройствах для сварки расплавом. Предложена усовершенствованная конструкция устройства для сварки расплавом. Выполнено числовое моделирование процесса плавления для традиционной и усовершенствованной конструкций. Установлено распределение давления на входе в канал и температуры на выходе из него для различных скоростей подачи прутка. Подтверждена энергетическая эффективность предложенной конструкции по сравнению с существующими.

Ключевые слова: плавление, полимер, сварка, присадочный материал, моделирование.

MODELING OF MELTING OF POLYMERIC BAR IN THE WELDING PROCESS WITH FILLING MATERIAL

A mathematical model of the process of melting polymer rod in devices for welding with a melt is made. An improved design of the melt welding device is proposed. Numerical modeling of the melting process for traditional and improved designs is performed. The distribution of the pressure at the inlet to the channel and the temperature at its outlet for different feed rates of the rod are established. The energy efficiency of the proposed design is confirmed in comparison with the existing ones.

Key words: melting, polymer, welding, filler material, modeling.

АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 62

Кулалаев А.В.

Інтернаціональна технічна економічна компанія «ІнтерТЭК»

Кулалаев В.В.

Інтернаціональна технічна економічна компанія «ІнтерТЭК»

ВВЕДЕНИЕ КРИТЕРИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТОРСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В работе представлен и разработан универсальный критерий оптимальных конструкторских решений (КОКР) при создании новых энергетических систем с повышенными энергетическими выходными параметрами с единицы массы системы. Разработан алгоритм расчетов критерия и приведен пример его применения. Введенный критерий может быть использован при разработке новых энергетических систем различного типа и промышленного назначения. Использование введенного критерия на этапе эскизного проектирования способствует получению принципиально новых, прорывных решений при конструировании энергетических систем. Анализ критерия позволяет определить запас энергетических характеристик, недополученных при применении стандартных конструкторских решений.

Ключевые слова: критерий, оптимальное решение, параметр, энергетическая система, метод, логика, вероятность.

1. Общие положения

Принятие решений любого ранга является одной из приоритетных проблем интеллектуальной деятельности современного человека. Подтверждением этому может служить большое число публикаций, связанных с рассматриваемой тематикой, ограниченный обзор можно найти в [1–11; 13–15]. В тоже время публикаций по исследованию проблем принятия оптимальных решений при техническом инженерном конструировании явно недостаточно, при этом не исключаются и некоторые креативные области деятельности [1; 2; 5; 6]. Развитие научно-технического прогресса невозможно без решения актуальной проблемы: выбор оптимальных конструкторских решений любого уровня при создании новых энергетических систем (далее – ЭС) различного назначения. Решение проблемы, по нашему мнению, лежит в поиске структуры специального универсального числового критерия оптимальных конструкторских решений (далее – КОКР) при создании новых ЭС, анализ которого может открыть новые, оптимальные научные и технические пути создания концепции ЭС с новыми техническими и физическими свойствами. Становится понятным, что поиск вида и структуры универсального

предусматривает применение методов математической статистики и формальной логики. Это связано с тем, что в конструкторской практике, по опыту создания новой техники, всегда должен использоваться аналог будущей ЭС с уже заданными техническими характеристиками, которые подвергаются всестороннему системному феноменологическому анализу – критике – синтезу в виде набора поля статистических данных уже созданных систем. Приведенные рассуждения позволяют сформулировать цель работы, которая заключается в разработке вида и состава специального универсального числового критерия оптимальных конструкторских решений при создании новых ЭС. Работа выполнена Интернациональной технической экономической компанией «ІнтерТЭК», г. Харьков (UA), в рамках международного проекта (Соединенные Штаты Америки (далее – США) – Украина) Р693 УНТЦ, г. Киев.

2. Структура и состав универсального критерия оптимальных конструкторских решений

Оптимизация принятых конструктивных решений и определение структуры критерия K_{OKP} тесно связаны с набором и системным анализом большого статистического материала по мировым

аналогам разработанных ЭС различного назначения. Системный анализ должен основываться на применении законов формальной логики, переходящих в математическую логику, с подходами феноменологического метода и привлечением методов математической статистики [12]. Таким образом, на основании анализа собранных мировых статистических данных по разработкам ЭС определяется структура и состав предлагаемого нового критерия K_{OKP} . Для наглядности логических и математических выкладок создадим логическую модель построения критерия K_{OKP} , представленную на рис. 1.

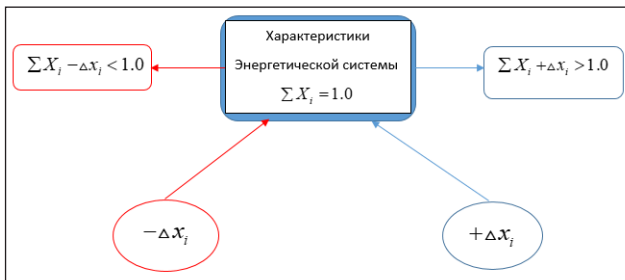


Рис. 1. Схема логической модели построения критерия K_{OKP} в общем виде

Допустим, что аналоговая ЭС обладает интегральной условной энергетической и массовой характеристикой $\Sigma X_i = 1.0$, тогда при внешнем условно интеллектуальном воздействии, например, конструктивном изменении (Δx_i) составляющих агрегатов и узлов, при принятии новых конструктивных или технологических решений возможны (вероятностные) исходы:

1. Принятия неверных (неоптимальных) конструкторских решений ($+\Delta x_i$), тогда интегральная характеристика ЭС приводится к виду $\Sigma X_i + \Delta x_i > 1.0$, т. е. состояние системы ухудшится по логической модели:

$$+\Delta x_i \Rightarrow \Sigma X_i + \Delta x_i > 1.0$$

2. Принятия верных (оптимальных) конструкторских решений

($-\Delta x_i$), тогда интегральная характеристика ЭС приводится к виду $\Sigma X_i - \Delta x_i < 1.0$, т. е. состояние системы улучшится по логической модели:

$$-\Delta x_i \Rightarrow \Sigma X_i - \Delta x_i < 1.0$$

3. При $\Delta x_i = 0$ соответственно $\Sigma X_i = 1.0$, энергетическое состояние системы не изменится, что приведет к непроизводительным затратам материальных средств.

Далее, следуя законам формальной логики: непротиворечивости, тождества, исключения третьего и закону достаточного основания (детальное применение указанных законов в терминах булевой алгебры в работе не приводится для

сокращения необходимых выкладок и для простоты понимания материала, что не отражается на качестве полученных результатов), можно записать следующие логические тождества:

$$\Sigma X_i \Rightarrow \prod_1^n \eta_i ;$$

$$\Sigma X_{io} \Rightarrow \prod_1^n \eta_{io} , \quad (1)$$

где η_i, η_{io} – КПД составляющих конструктивных узлов и агрегатов ЭС и её, выбранного на основании статистики, аналога соответственно; $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – число агрегатов и конструктивных узлов в энергосистеме.

На основании зависимостей логических построений (1) получено соотношение вида:

$$\frac{\Sigma X_i}{\Sigma X_{io}} \Rightarrow \prod_1^n \frac{\eta_i}{\eta_{io}} \in [(1 <) - (\geq 1)] . \quad (2)$$

Применяя принцип тождественных аналогий на основании зависимости (2), получим соотношения, например, выходного усилия или мощности, разрабатываемой ЭС, к соответствующим параметрам аналога, близкого по энергетическим характеристикам, в таком виде:

$$\frac{P_i}{P_{oi}} \Rightarrow \prod_1^n \frac{\eta_i}{\eta_{io}} \in [(1 <) - (\geq 1)] , \quad (3)$$

где P_i, P_{oi} – энергетический параметр, заданный техническими условиями разработки новой ЭС и выбранного аналога на основании анализа данных набранной статистики выполненных конструкций.

Зависимость (3) можно преобразовать в другую форму, удобную для дальнейших исследований, на основании известных соотношений в общем виде для определения конкретных энергетических параметров ЭС. Анализ зависимостей (3) показывает, что при разработке ЭС, к которым относятся различные типы, например, ракетных и газотурбинных двигателей, повышение или понижение тяги вновь разрабатываемого двигателя может быть при значении произведения отношений КПД:

– $\prod_1^n \frac{\eta_i}{\eta_{io}} > 1.0$ – повышение энергетического параметра;

– $\prod_1^n \frac{\eta_i}{\eta_{io}} < 1.0$ – понижение энергетического параметра;

– $\prod_1^n \frac{\eta_i}{\eta_{io}} = 1.0$ энергетический параметр без изменений.

Таким образом, значения выходных энергетических параметров P_i вновь разрабатываемой ЭС (проектируемой) будет зависеть от выбора современных (передовых) технических решений

и технологий создания конструктивных узлов, агрегатов с повышенным КПД. Исследования изменения выходной энергии новой ЭС при эскизном проектировании за счёт принятия тех или иных технологических решений можно проводить по преобразованной формуле (3), которая будет использоваться для дальнейших построений искомого критерия в логической модели такого вида:

$$P_i = P_{oi} \cdot \Psi_p, \quad (4)$$

где $\Psi_p = \prod_{i=1}^n \frac{\eta_i}{\eta_{oi}}$ – дискретная числовая функция изменения энергетического выходного параметра разрабатываемой ЭС за счёт принятых конструктивных и технологических решений (например, тип системы питания, компоновочная схема, адекватность расчётных математических моделей, уровень универсальности методик расчетов и др., зависящих от современного мирового технического уровня развития отрасли разработок ЭС заданного типа), принимающая рациональные, стационарные конечные значения в интервале $1.0 \leq \Psi_p < 1.0$ на основании анализа статистики особенностей современных технологий, созданных аналогов ЭС.

Приведем пример использования предлагаемого метода первоначальной оценки величины тяги концептуально разрабатываемого жидкостного реактивного двигателя (далее – ЖРД) для дальнего космоса с некоторыми новыми свойствами. Известно, что полный интегральному КПД ЖРД на идеальных расчётных режимах орбитальной работы определяется соотношением:

$$\eta_{\Sigma}^m = \frac{\eta_i \cdot \left(\frac{C_{oi}}{W_c} \right)^2}{\exp \left\{ \frac{C_{oi}}{W_c} \right\} - 1}, \quad (5)$$

где $\eta_i = f(W_c(\eta_i), H_{T\alpha})$ – термический КПД ЖРД как тепловой машины; $W_c(\eta_i)$ – скорость истечения продуктов сгорания из сопла, которая зависит от совершенства конструкции узлов и агрегатов двигателя (η_i); $H_{T\alpha}$ – теплотворная способность топлива, зависящая от коэффициента избытка окислителя при горении; C_o – скорость полета ракетносителя.

Для расчётов используем полный интегральный КПД ЖРД для дальнего космоса, зависимость (5). Допустим, что близкий аналог разрабатываемого ЖРД имеет искомый параметр $\eta_{io} = 0.39$ и переменное отношение скоростей $C_o / W_c = Var$, тогда термический КПД создаваемого ЖРД после анализа параметров двигателя аналога принимает вид:

$$\eta_i = f(W_c(\eta_i), H_{T\alpha}) = \eta_{io} \cdot \Psi_p. \quad (6)$$

Полный интегральный КПД η_{Σ}^m изменяется согласно графикам, приведенным на рис. 2.

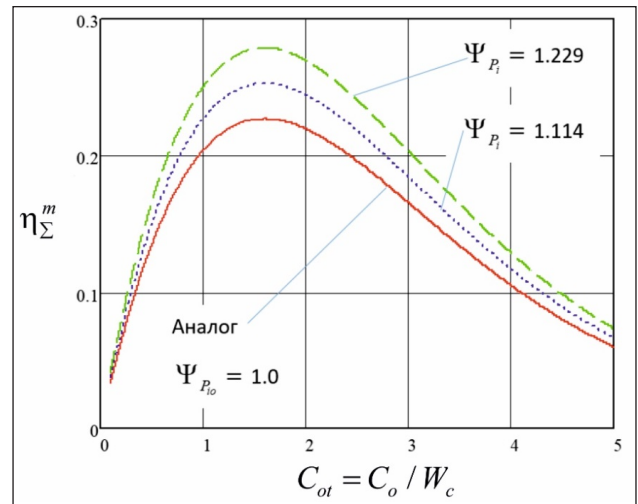


Рис. 2. Изменения полного интегрального КПД ЖРД, проектируемого и аналогового, в зависимости от соотношения скоростей

Анализ графиков рис. 2 показывает, что полный интегральный КПД ЖРД меняется в зависимости от соотношения скоростей полета ракетносителя и скорости истечения продуктов сгорания из сопла с максимумом. Это связано с тем, что скорость истечения продуктов сгорания W_c определена конечным значением теплотворной способности ракетного топлива $H_{T\alpha}$ при теоретически неограниченном значении скорости полета C_o . С учётом того, что появилась возможность влиять на соотношения Ψ_p , выбранного в результате анализа конструкции аналогового образца ЖРД, например, за счёт изменения термического КПД двигателя (см. формулу (6)) путем подбора режима оптимального горения топлива за счёт подбора соответствующий системы КПД η_i нового двигателя, что в конечном итоге может приводить к увеличению базовой (заданной тяги) или к её уменьшению (3). Зависимость тяги проектируемого ЖРД от изменения соотношения выбранного полного интегрального КПД $\eta_{\Sigma}^m = \frac{\eta_{\Sigma i}}{\eta_{\Sigma oi}^m}$ показана на графиках рис. 3. Анализ характера изменения базовой тяги, например, $P_T^{(0)} \approx 111$ кН, который представлен на графике рис. 3, показывает, что при соотношении полных интегральных КПД $\frac{\eta_{\Sigma i}^m}{\eta_{\Sigma oi}^m} = 0.43/0.35 = 1.229$ базовая тяга разрабатываемого ЖРД может быть увеличена на почти 23% и составит (см. формулу (4)) $P_T^{(0)} = 111 \cdot 1.229 \approx 136$ кН (показано стрелками на графике рис. 3), или уменьшена, что видно из графика.

Далее используем понятие коэффициента эффективности энергетической и массовой харак-

теристик ЭС (энерготдачи с одного кг массы конструкции) в виде:

$$K_{D_i} = \frac{P_i}{M_i} = P_i \cdot \left(\frac{1}{M_i}\right), \text{ кН/кг; кДж/кг, (7)}$$

где P_i – выходное усилие или энергия, в кН или кДж; M_i – масса ЭС в кг.

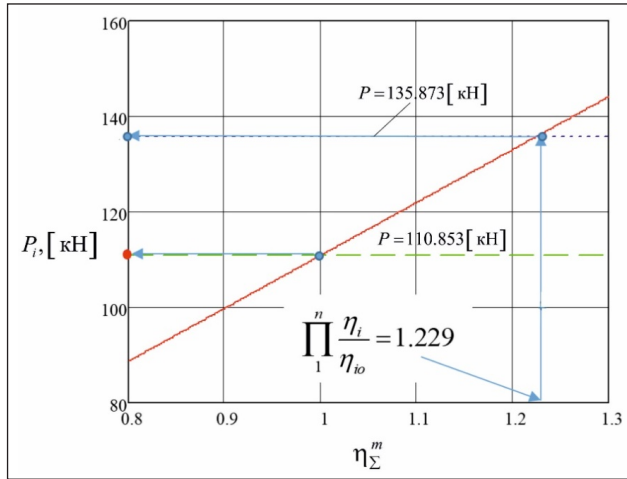


Рис. 3. Зависимость тяги проектируемого ЖРД от изменения соотношения выбранного полного КПД

$$\eta_{\Sigma}^m = \frac{\eta_{\Sigma i}^m}{\eta_{\Sigma oi}^m}$$

по сравнению с аналоговым двигателем,
 $P_i = 110.853 \text{ кН}$ – условно принятая тяга
ЖРД аналога

Как правило, величина K_{D_i} задана при проектировании в Техническом задании на разработку проекта ЭС. Таким образом, входящая в состав коэффициента величина P_i может быть исследована при первоначальном анализе и эскизном проектировании с использованием полученных зависимостей (3) и (4). Выше, на примере разработки ЖРД с новыми свойствами, показано, каким образом на этапе раннего эскизного проектирования можно исследовать величину P_i базовой ЭС на основании набора статистических данных аналоговой системы, формула (5).

Проведем исследование возможности изменения массы вновь создаваемой ЭС, введенной в формулу (7) в виде зависимости $\left(\frac{1}{M_i}\right)$, на основании обработки статистики конструктивных характеристик аналога ЭС. Отметим, что в математической логике важную роль играют понятия дедуктивной теории и исчисления. Под исчислением будем понимать совокупность правил вывода, позволяющих считать некоторые формулы выводимыми. Правила вывода подразделяются на два класса. Одни из них непосредственно квалифицируют некоторые формулы как выводимые. Такие правила вывода принято называть аксиомами. Другие же позволяют считать выводимыми формулы А,

синтаксически связанные некоторым заранее определенным способом с конечными наборами свойств системы, например, A_1, A_2, A_3 выводимых формул. В данном случае применяем правило второго типа, которым является правило modus ponens: если выводимы формулы А и В, то выводима и формула В. Формула А в виде влияния численной дискретной функции изменения выходной энергии ЭС $\Psi_p = \prod_{i=1}^n \eta_{oi}$ за счёт принятых конструкторских и технологических решений правомерно введена в зависимость (4). На основании дедуктивной теории введем понятие стационарной численной дискретной функции изменения массы разрабатываемой ЭС Ψ_M . Предположим, что принятые оптимальные конструктивные решения при создании аналоговой ЭС привели к массе системы M_{oi} с заданной вероятностью W_{oi} , полученной на основании обработки данных статистики, тогда правомерна логическая модель:

$$M_{oi} \Rightarrow 1 - W_{oi}, \quad (8)$$

где $(1 - W_{oi})$ – величина, выражающая вероятность неиспользуемой возможности по уменьшению или получению оптимальной массы ЭС аналога при его разработке.

В зависимости (8) величина $(1 - W_{oi})$ известна на основании обработки поля статистический данных конструкций ЭС аналогов. При этом правомерно принимаем, что величины вероятностей W_i и W_{oi} подчиняются нормальному закону распределения [12]. Далее по аналогии логической модели (8) можно записать логическую цепь вида:

$$M_i \Rightarrow 1 - W_i, \quad (9)$$

где $(1 - W_i)$ – величина переменная, выражающая вероятность неиспользуемой возможности по получению оптимальной или заданной массы, вновь разрабатываемой ЭС.

При этом величина, выражающая вероятность неиспользуемой возможности по получению оптимальной массы ЭС (W_i), может быть отлична от величины W_{oi} – предельного значения в большую сторону, т. е. $W_i \geq W_{oi}$, исходя из законов формальной логики: непротиворечивости, тождества, исключения третьего и закона достаточного основания.

На базе зависимостей (8) и (9) можно записать логические цепи:

$$\frac{1}{M_i} \Rightarrow \frac{1}{1 - W_i};$$

$$\frac{1}{M_{oi}} \Rightarrow \frac{1}{1 - W_{oi}}. \quad (10)$$

После преобразований соотношение (10) приводится к виду

$$\frac{1}{M_i} \Rightarrow \frac{1}{M_{oi}} \cdot \left(\frac{1 - W_{oi}}{1 - W_i}\right). \quad (11)$$

На основани зависимости (10) можно записать:

$$\Psi_M = \frac{M_{oi}}{M_i} \Rightarrow \left(\frac{1 - W_{oi}}{1 - W_i} \right) \geq 1.0, \quad (12)$$

где Ψ_M – стационарная числовая дискретная функция изменения массы, разрабатываемой ЭС при принятии вероятных оптимальных конструкторских и технологических решений.

Очевидно, что стационарная дискретная функция (12) изменения массы ЭС принимает значения $\Psi_M \geq 1.0$, которое определяется на основе обработки поля статистических данных по массе аналоговых ЭС. На основании полученных зависимостей (4) и (12) вводим интегральную численную параметрическую функцию принятия оптимальных конструкторских решений в виде:

$$\Psi_{OKP} = \Psi_M \cdot \Psi_P = \left(\frac{1 - W_{oi}}{1 - W_i} \right) \cdot \prod_1^n \frac{\eta_i}{\eta_{oi}}. \quad (13)$$

Окончательно формируем вид и состав обобщающего критерия принятия оптимальных конструкторских и технологических решений при разработке новых ЭС с более высокими эксплуатационными характеристиками в виде:

$$K_{OKP} = K_{D_o} \cdot \Psi_{OKP} = K_{D_o} \cdot \left(\frac{1 - W_{oi}}{1 - W_i} \right) \cdot \prod_1^n \frac{\eta_i}{\eta_{oi}} = \left(\frac{P_i}{M_i} \right) \cdot \left(\frac{1 - W_{oi}}{1 - W_i} \right) \cdot \prod_1^n \frac{\eta_i}{\eta_{oi}}, \quad (14)$$

где $K_{D_o} = \left(\frac{P_i}{M_i} \right)_o$ – коэффициент эффективности энергетической и массовой характеристик ЭС, заданный Техническим заданием на проектирование.

Критерий в виде (14) полностью отвечает общим требованиям критериальных величин, так как все входящие в состав критерия величины являются определяемыми, стационарными константами для заданных условий оптимизации принимаемых технологических и конструктивных решений при эскизном (начальном) проектировании ЭС с заданными выходными параметрами.

Приведем пример расчетов вариантов принятия возможных оптимальных конструкторских и технологических решений при создании новых ЭС с применением разработанного обобщенного критерия принятия оптимальных технологических и конструкторских решений K_{OKP} (14). Результаты расчетов представлены в виде графиков на рис. 4. Проведенный анализ графиков рис. 4 показывает, что принятия оптимальных конструкторских решений по массе ЭС с вероятностью $W_i = 0,2$ при опорной вероятности $W_{oi} = 0,18$ для аналоговой системы, при оптимальных технологических решениях $\Psi_P = \eta_{pot} = \prod_1^n \frac{\eta_i}{\eta_{oi}} = 1,0$ уже получаем некоторое преимущество над условно принятым опорным коэффициентом, (см. нижнюю красную линию графика).

При $W_i = 0,2$ и $\eta_{pot} = 1,13$ критерий $K_{OKP} = 0,51 > K_{D_o} = 0.443$, т. е. конструктивно технологическое преимущество параметров разрабатываемой новой ЭС ожидается на уровне 15,1% за счёт уменьшения массы или возрастания величины выходной энергии при той же массе системы. При реализации оптимальных конструктивных решений ($W_i = 0,3$) и технологических при $\eta_{pot} = 1,18$ преимущество уже возрастает приблизительно на 40%. При этом следует проводить тщательную проработку полученных показателей с точки зрения технической реализуемости полученных преимуществ.

Дальнейший анализ графиков рис. 4 показывает, что при вероятности $W_i < 0.18$, т. е. меньшей, чем полученная статистическая опорная вероятность аналоговой ЭС $W_{oi} = 0,18$ при $\eta_{pot} = 1,0$ выходные параметры разрабатываемой ЭС становятся ниже заявленных в Техническом задании проекта (красная нижняя линия графика на рис. 4). Однако при вероятности принятия оптимальных конструктивных решений $W_i \approx 0,27$ и $\eta_{pot} = 1,0$ (красная нижняя линия графика) преимущество принятых технологических решений приводит к возрастанию выходных параметров разрабатываемой ЭС на 12,8%, а при $\eta_{pot} = 1,13$ (средняя синяя линия графика) и той же вероятности принятия оптимальных конструктивных решений возрастание базовых параметров ЭС составит 26,4%.

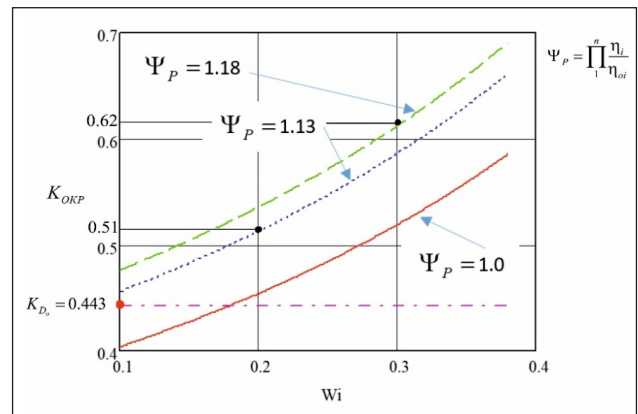


Рис. 4. Изменение обобщенного критерия принятия оптимальных технологических и конструкторских решений K_{OKP} в зависимости от принятия оптимальных конструктивных решений с переменной вероятностью $W_i \geq W_{oi}$ по массе при создании ЭС с новыми выходными энергетическими параметрами относительно аналоговой системы, $K_{D_o} = 0.443$ – опорный, заданный техническим заданием параметр

На рис. 5 представлено изменение стационарной числовой дискретной функции Ψ_M изменения массы разрабатываемой ЭС при принятии опор-

ных переменных вероятных W_i оптимальных конструкторских и технологических решений и известной базовой вероятности W_{oi} для аналогов ЭС.

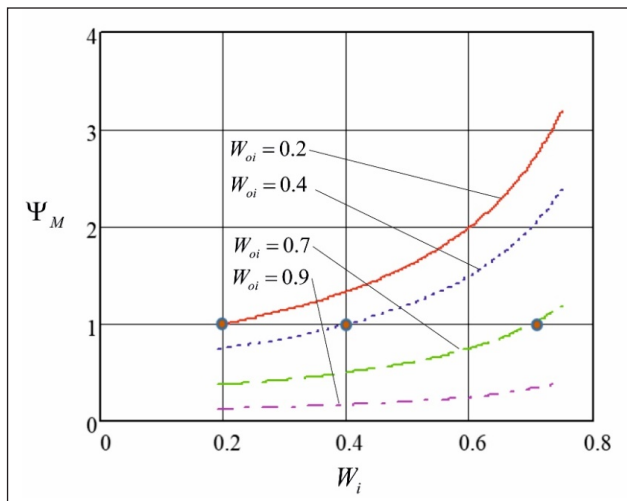


Рис. 5. Изменение стационарной числовой дискретной функции Ψ_M изменения массы разрабатываемой ЭС при принятии оптимальных конструкторских и технологических решений при опорной переменной вероятности W_i и известной базовой вероятности W_{oi}

Из анализа графиков рис. 5 видно, что при изменении опорной базовой вероятности $W_{oi} \in [0,2 - 0,9]$, определяемой на базе обработки поля статистических данных аналогов ЭС, функция принимает значение $\Psi_M \geq 1,0$ только в случаях $W_i \geq W_{oi}$. Это объясняется тем, что при разработке ЭС с новыми свойствами следует принимать более прогрессивные технологические и конструктивные решения с известной вероятностью, при которой стационарная числовая дискретная функция изменения массы ЭС принимает значения $\Psi_M \geq 1,0$.

3. Выводы

Введенный в работе обобщенный универсальный критерий принятия оптимальных технологических и конструкторских решений K_{OKP} позволяет проводить всестороннюю оптимизацию выходных энергетических и массовых характеристик, вновь создаваемых ЭС на стадии создания концепции и ранних стадиях эскизного проектирования ЭС различного назначения. Системный анализ введенного критерия позволяет определить новые оптимальные или рациональные научные и технические пути решения технологических и конструкторских задач при создании ЭС с новыми физическими свойствами.

Список литературы:

1. Стрелец А., Фирсов В. Размерные расчеты в задачах оптимизации конструкторско-технологических решений. М.: Машиностроение, 1988. 122 с.
2. Балыбин В., Лунев В., Муромцев Д., Орлова Л. Принятие проектных решений: учебное пособие. Ч. 1. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. 80 с.
3. Ногин В. Принятие решений при многих критериях: учебно-методическое пособие. СПб.: ЮТАС, 2007. 104 с.
4. Кини Р., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981. 217 с.
5. Ларичев О. Теория и методы принятия решений. М.: Логос, 2000. 314 с.
6. Лотов А. и др. Компьютер и поиск компромисса. Метод достижимых целей. М.: Наука, 1997. 389 с.
7. Подиновский В. Об относительной важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. Многокритериальные задачи принятия решений. М.: Машиностроение, 1978. С. 48–82.
8. Розен В. Цель – оптимальность – решение. М.: Радио и связь, 1982. 315 с.
9. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений. М.: Наука, 1978. 298 с.
10. Saaty T. Multicriteria decision making. The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. University of Pittsburgh, 1990.
11. Steuer R. Multiple criteria optimization: theory, computation and Application. J. Wiley & Sons Inc., N.Y.; Chichester; Brisbane; Toronto; Singapore, 1986 (Штойер Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения. Пер с англ. М.: Радиоисвязь. 1992. 413 с.).
12. Кобзарь А. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных сотрудников. М.: Физматлит, 2006. 816 с.
13. URL: <http://fevt.ru/load/project/58-1-0-178> (дата обращения: 8.05.2017).
14. Основы теории принятия решений. URL: <http://b-i.narod.ru/sys.htm> (дата обращения: 25.06.2017).
15. Стрелец А., Фирсов В. Размерные расчеты в задачах оптимизации конструкторско-технологических решений. М.: Машиностроение, 1988. 122 с.

ВВЕДЕННЯ КРИТЕРІЮ ОПТИМАЛЬНИХ КОНСТРУКТОРСЬКИХ РІШЕНЬ ПІД ЧАС СТВОРЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

У роботі представлений і розроблений універсальний критерій оптимальних конструкторських рішень (КОКР) для створення нових енергетичних систем із підвищеними енергетичними вихідними параметрами з одиниці маси системи. Розроблено алгоритм розрахунків критерію, наведено приклад його застосування. Введений критерій може бути використаний під час розроблення нових енергетичних систем різного типу і промислового призначення. Використання введеного критерію на етапі ескізного проектування сприяє отриманню принципово нових, проривних рішень у конструюванні енергетичних систем. Аналіз критерію дозволяє визначити запас енергетичних характеристик, недоотриманих в разі стандартних конструкторських рішень.

Ключові слова: критерій, оптимальне рішення, параметр, енергетична система, метод, логіка, ймовірність.

ADOPTION OF THE CRITERION OF OPTIMAL DESIGN SOLUTIONS WHILE DEVELOPMENT OF THE ENERGY SYSTEMS

The paper presents the developed universal criterion of optimal design solutions (CODS) to be applied during development of new energy systems with the increased power output parameters from a system's unit mass. An algorithm for calculating the criterion was developed and an example of its application was presented. The introduced criterion can be used in course of development of new energy systems of various types and industrial applications. Adoption of the introduced criterion at the preliminary design stage contributes to obtaining the fundamentally new, breakthrough solutions in design of the energy systems. Analysis of the criterion allows to determine the reserve of power characteristics which cannot be obtained while using the standard design solutions.

Key words: criterion, optimal solution, parameter, energy system, method, logic, probability.

Фесенко О.Д.

Військовий інститут телекомунікації та інформатизації імені Героїв Крут

ВДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ОРІЄНТАЦІЇ БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА В ТРИВИМІРНОМУ ПРОСТОРИ ЗА ДОПОМОГОЮ МІКРОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ СИСТЕМИ НАВІГАЦІЇ НА ОСНОВІ ФІЛЬТРА МАДЖВІКА

Фільтр обробляє масиви даних, що надходять із датчиків і усуває проблеми точності та налаштування параметрів фільтрів, заснованих на підходах Калмана. Для подання орієнтації використовується кватерніон, щоб описати положення в просторі в трьох вимірах без проблем, пов'язаних з описом положення кутами Ейлера (складання рамок). Завдання полягає в обчисленні єдиної оцінки орієнтації, отриманої шляхом вимірювань акселерометра, гіроскопа і магнітометра в реальному часі.

Ключові слова: оцінка орієнтації, інерційний блок вимірювання, магнітна кутова швидкість і гравітація, кватерніон, безпілотний літальний апарат.

Постановка проблеми. Однією з головних цілей розроблення систем управління безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА) є підвищення точності і достовірності формування параметрів орієнтації та навігації. Сьогодні основними системами навігації БПЛА є інерціальна система навігації і супутникова. Однак в умовах, де прийом сигналів глобальної супутникової системи (далі – ГСС) неможливий, необхідно використовувати менш традиційні підходи до задачі управління літальними апаратами. Інерціальні системи зараз широко застосовуються для навігації літальних апаратів. З усіх навігаційних систем вони найкраще відповідають цілому комплексу важливих вимог [2, с. 14–20], як-от універсальність, цілковита автономність, захищеність і стійкість. У разі ж використання БПЛА застосування високоточних інерціальних навігаційних систем (далі – ІНС) [3, с. 372–378] також цілком не вирішує проблему, тому що:

– маса інерціальної системи «середньої точності» на лазерних або волоконнооптичних гіроскопах становить від 8 кг, що робить проблематичним їх використання на БПЛА малої і навіть середньої дальності;

– принциповим обмеженням ІНС є зростання помилки визначення координат із плином часу автономної роботи [3, с. 375].

Точність автономного числення координат для сучасних ІНС становить приблизно 1,5 км на годину

польоту (для систем високої точності), що не дозволяє забезпечити високоточне визначення координат.

Як було вказано вище, одним із суттєвих недоліків ІНС, які обмежують застосування такої системи навігації до легких та мініатюрних БПЛА, є масогабаритні показники.

У такому разі одним із рішень є застосування автономної інерціальної навігації на основі мікроелектронних механічних систем (далі – МЕМС), яка здатна забезпечити супровід на підставі розрахунку траєкторії, що необхідно для підтримання точності в разі блокування прямої видимості або появи інших перешкод. Але практична реалізація можливості тривалого автономного польоту БПЛА тільки на основі показань інерціальних МЕМС-датчиків за сучасного рівня розвитку мікроелектромеханічних системних технологій є непростим завданням. Річ у тому, що основною проблемою інерціальних МЕМС-датчиків є дрейф нуля гіроскопа, випадковий складник якого досить важко компенсувати, а механічні й електронні прилади бортового обладнання БПЛА породжують локальні феромагнітні перешкоди з урахуванням магнітних спотворень Землі [4, с. 40–47]. Систематичні похибки датчиків можуть залежати від навколишнього середовища, від температури, стабільності напруги живлення, від вологості, спотворення магнітних полів, радіаційного випромінювання.

Отже, наявне протиріччя між забезпеченням автономної навігації за мінімальних масогабаритних показників БПЛА, що є суттєвою необхідністю для виконання низки завдань, з одного боку, і забезпеченням мінімальної похибки відхилення від маршруту польоту (за відсутності сигналів ГСС), з іншого боку. Тому необхідне розроблення методів підвищення точності роботи автономної систем навігації, побудованих за технологіями мікроелектронних механічних систем для використання їх у сучасних БПЛА, які виконують завдання протягом тривалого часу на значних відстанях.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Масштабність сучасних наукових досягнень за темою дослідження вагома. Питання побудови стійкої й автономної системи навігації БПЛА на основі МЕМС-датчиків розглядало чимало вчених.

Так, С. Тимошенко [5, с. 23–30] розглянув параметри МЕМС-датчиків, показав перспективу побудови систем орієнтації на їх основі. Він дослідив вплив сумарної похибки вимірювальних систем на точність визначення параметрів руху об'єкта автономною системою орієнтації на основі методів фільтра Калмана. Розроблення комплексної високоточної системи супутникової навігації на основі фазових вимірювань із підтримкою інерціальної системи на базі МЕМС дослідили у своїй роботі П. Горев і В. Костиков [6, с. 39–49].

Як відомо, для компенсації похибок інерційних вимірювальних МЕМС-пристроїв застосовують фільтр Калмана [7, с. 185–194]. Широке використання рішень Р. Калмана є доказом їхньої точності й ефективності, однак вони мають низку недоліків. Насамперед йдеться про складність реалізації, зазначену в літературі [8–10], лінійну регресію ітерації, що є основоположним для процесів Р. Калмана, вимоги до частоти дискретизації, які значно перевищують пропускну здатність об'єкта. Наприклад, частота дискретизації між 512 Гц і 30 кГц може бути використана в додатках захоплення руху. Стан відносин, що описує кінематику в трьох вимірах, зазвичай потребує більше векторів стану і реалізації розширеного фільтра Калмана [10, с. 273–282], що передбачає додаткові вимоги до комп'ютерного обладнання БПЛА.

Завдання стійкої автономної навігаційної системи на основі застосування МЕМС-технологій вирішують за допомогою фільтра оцінки орієнтації, запропонованого С. Маджвіком [1]. Оригінальний фільтр Маджвіка має дуже просту структуру, він забезпечує високу точність і зменшує

обчислювальні навантаження порівняно із сучасними методами Р. Калмана [11, с. 815–822], які можуть бути приблизно у 20 разів повільнішими порівняно з фільтром Маджвіка [12, с. 63–80].

Постановка завдання. Постає актуальне завдання побудови автономної системи навігації з мінімальним обчислювальним навантаженням, яка могла б забезпечити автономний режим польоту на відносно достатню відстань для виходу безпілота із зони радіоелектронних завад у критичному режимі польоту. Необхідно розробити метод орієнтації літального апарата (далі – ЛА) у тривимірному просторі на основі дешевих інерціальних вимірювальних пристроїв на базі МЕМС-технологій за допомогою фільтра Маджвіка.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для оцінки орієнтації ЛА в просторі використовується блок інерціальних вимірювальних пристроїв, до складу яких входить акселерометр, магнітометр, гіроскоп. Якщо БПЛА, який потрапив у зону невизначених перешкод, автоматично переходить у критичний режим польоту, коли орієнтується тільки на дані, які надходять із блока ІНС, без допоміжних систем навігації, то необхідно зазначити, що така система не може здійснювати автономне обчислення пройденого шляху через високі швидкості дрейфу гіроскопа та феромагнітні похибки бортового обладнання БПЛА. І зазвичай для оброблення масивів даних, що надходять із блока ІНС, потрібен досить значний інтервал часу, особливо якщо система навігації обладнана на основі МЕМС-технологій на малопотужних процесорах. Отже, орієнтації, особливо з низьким енергоспоживанням, додатків реального часу й оцінки орієнтації не повинні містити інтенсивні арифметичні обчислення.

Зазвичай моделі орієнтації ЛА в просторі, які використовують датчики ІНС, базуються на використанні прямого представлення Ейлера чи представлення кватерніонів. Кватерніонне представлення є обчислювально ефективним і, на відміну від матриць Ейлера, не залежить від умов сингулярності [13, с. 174–190].

У літературі є декілька рішень, які використовують кватерніони на позначення орієнтації. А саме, для цього широко використовуються методи Р. Калмана [8–9]. Незважаючи на те, що такі методи точні, вони не підходять для малопотужних процесорів, оскільки вони містять матричні інверсії й обчислення коваріаційних матриць. На прикладі розширеного фільтра Калмана [14, с. 7585–7591] показано, що вони приблизно у



Рис .1. Блок-схема представляє фільтр ІНС із магнітометром, акселерометром і гіроскопом

20 разів повільніші, порівняно з фільтрами орієнтації [1] та [7], пропонують середнє підвищення лише на 9% у динамічному стані похибки кутів орієнтації.

Оригінальний фільтр Маджвіка, представлений в [1], є обчислювально ефективним методом, який використовує представлення кватерніона і підходить для малопотужних додатків захоплення руху в реальному часі. Підхід забезпечує досить високу точність і дозволяє мінімізувати витрати часу на обчислення масивів даних, необхідних для реалізації методу Калмана. Фільтр Маджвіка використовує алгоритм градієнтного спуску.

Для досягнення кращої точності оброблення даних ІНС-датчиків можна знайти кілька альтернативних рішень. Наприклад, метод [15] вводить ефективні способи визначення наявності похибок показників датчиків і усунення тимчасових збоїв. Це може допомогти адаптивно встановити коефіцієнт підсилення фільтра Маджвіка [1], щоб компенсувати тимчасову похибку показників датчиків. Фільтр навіть може бути реалізований на дешевих і малопотужних мікроконтролерах, як-от ARM Cortex M0, який підтримує лише цілі та фіксовані точки арифметичних операцій [16, с. 831–844]. Але реалізація автономної навігації на базі MEMS для швидкісних БПЛА за алгоритмом Маджвіка не відповідає вимогам, тому що під час швидкого динамічного руху безпілотної фільтр не встигає вчасно та коректно обробляти дані, що надходять в ІНС MEMS, і, як наслідок, БПЛА не може виконати політ за заданою траєкторією.

У роботі запропоновано модифікацію етапу корекції методу градієнтного спуску на основі фільтра Маджвіка, що гарантує покращення точ-

ності кватерніона без збільшення загальної кількості необхідних скалярних арифметичних операцій. Запропонований фільтр може значною мірою підвищити точність, оскільки він використовує етап корекції градієнтного спуску, який містить всі показання датчиків у момент часу t . Фільтр покращує загальну точність з погляду абсолютної та середньоквадратичної похибки.

Запропонований спосіб орієнтований на оброблення даних масивів ІНС із магнітометром. Припускається, що показання датчиків ІНС спочатку пройшли необхідні методи калібрівання, фільтрації та нормалізації.

На рисунку 1 представлена загальна блок-схема фільтра Маджвіка (рис. 1).

Розглянемо алгоритм роботи запропонованого фільтра. Робота фільтра починається з обчислення даних гіроскопа кутової швидкості ω_x , ω_y і ω_z щодо осей X, Y, Z відповідно в системі відліку датчика для знаходження оцінки кватерніона гіроскопа в момент часу t :

$$q_{g,t} = q_{est,t-1} + (\Delta t/2) (q_{est,t-1} \otimes S_{g,t}), \quad (1)$$

де $q_{est,t-1}$ – попередня оцінка кватерніона в момент $t-1$; Δt – затримка між вимірами (період дискретизації); $q_{g,t}$ – оцінка кватерніона гіроскопа в момент t ; \otimes – продукт Гамільтона; $S_{g,t}$ – показники акселерометра в момент часу t .

Для коректного оброблення вхідних даних гіроскопа $q_{g,t}$ щодо показників акселерометра $S_{a,t}$ використовується метод градієнтного спуску на основі [1], який обчислюється таким рівнянням (2):

$$\nabla F(q_{g,t}, S_{a,t}) = JFg(q_{g,t})^T(q_{g,t}, S_{a,t}), \quad (2)$$

де $JFg(q_{g,t})$ – якобіан Fg , що є функцією невідповідності, яка являє собою похибку між початко-

вою оцінкою кватерніона q та показниками акселерометра Sa, t ;

∇F – функція градієнта.

Рівняння (3) описує злиття даних датчиків гіроскопа й акселерометра $Fg(qg, t, Sa, t)$:

$$Fg(qg, t, Sa, t) = q * g, t \otimes g \otimes qg, t - Sa, t, \quad (3)$$

де $g = [0, 0, 0, 1]$ – кватерніон, що представляє вектор еталонної гравітації в системі відліку Землі;

q^* – протиспрямований кватерніон (використовується для зміни системи відліку).

Якщо замінити початкову оцінку $q = qg, t$, то на цьому етапі за допомогою $qest, t-1$ проводиться розрахунок градієнтного спуску [1]. Ця незначна зміна може значно покращити загальну точність фільтра. Причиною є те, що за допомогою параметра qg, t як початкового припущення рішення градієнтного спуску поверне вектор корекції, який прямо відображає невідповідність між оцінкою гіроскопа в момент t та показниками акселерометра також в момент t . Цей вектор корекції разом з іншими розрахунками для оцінки орієнтації забезпечить набагато більшу загальну точність.

Щоб знайти нову оцінку орієнтації кватерніона в момент часу t , необхідно застосувати інтеграцію з коефіцієнтом підсилення β , що представлено в рівнянні (4):

$$qest, t = qg, t - (\beta \Delta t) \nabla, \quad (4)$$

Як відомо, у рішенні, запропонованому Маджвіком, функцію градієнта ∇F також необхідно нормалізувати, $\nabla F / \| \nabla F \|$, що не є обов'язковим у запропонованому варіанті рішення. Отже, такий спосіб передбачає ще менше скалярних арифметичних операцій.

Порівняльний аналіз похибок запропонованого способу й оригінального фільтра Маджвіка. Для порівняння точності двох варіантів фільтрації й оброблення даних ІНС необхідно спочатку обчислити похибку у вигляді оцінки кватерніона та гіроскопа в рівнянні (1). Похибку позначено як $eest, t-1$, яка наявна в попередній оцінці кватерніона в момент часу $t-1$, тобто $qest, t-1$, що показано в рівнянні (5):

$$qr, t-1 = qest, t-1 - eest, t-1, \quad (5)$$

де $qr, t-1$ є фактичною референтною визначення кватерніона орієнтації в момент $t-1$. Також означена похибка наявна в показаниках гіроскопа в момент t , тобто Sg, t і Se, t , тоді фактичні кутові швидкості в момент t позначаються як Srt . Зазначене представлено в рівнянні (6):

$$Sg, t = Sr, t + Se, t. \quad (6)$$

Далі необхідно переписати рівняння (1) так:

$$qg, t = (qr, t-1 + eest, t-1) + (\Delta t/2) (qr, t-1 + eest, t-1) \otimes (Sr, t + Se, t). \quad (7)$$

Подальший розрахунок показує:

$$qg, t = (qr, t-1 + (\Delta t/2) qr, t-1 \otimes Sr, t) + eest, t-1 + (\Delta t/2) qr, t-1 \otimes Se, t + qg, t = (qr, t-1 + (\Delta t/2) qr, t-1 \otimes Sr, t) + eest, t-1 + (\Delta t/2) qr, t-1 \otimes Se, t + (\Delta t/2) eest, t-1 \otimes (Sr, t + Se, t) = qr, t + eest, t-1 + eg, t, \quad (8)$$

де eg, t – порядок похибок, що виникають із поточних масивів даних гіроскопів у момент t і попередньої оцінки кватерніона в момент $t-1$, що наведено нижче в рівнянні (9):

$$eg, t = (\Delta t/2) qr, t-1 \otimes Se, t + (\Delta t/2) eest, t-1 \otimes (Sr, t + Se, t). \quad (9)$$

Метод градієнтного спуску спрямовує на визначення первинної оцінки кватерніона $qinit$ до іншої оцінки кватерніона qam, t , яка являє собою процес оброблення даних акселерометра Sa, t у момент t та магнітометра Sam, t у 9-осьовому режимі. Наступний крок здійснюється для мінімізації кількості операцій ітерації передбачення до наближеного результату, який являє собою вектор корекції, що генерується градієнтним спуском. Зазначене показано в рівнянні (10):

$$q \nabla, t \approx at(qinit - qam, t), \quad (10)$$

де $0 < at < 1$ є довільним коефіцієнтом корисної дії залежно від того, наскільки швидко ступінь градієнтного спуску формує свої початкові передбачення $qinit$ у напрямі qam, t . З наведеного рівняння отримуємо:

$$q \nabla, t = at(qinit - qam, t) + e \nabla, t, \quad (11)$$

де $e \nabla, t$ – залишкова помилка, яка відповідає наближенню градієнтного спуску. У наступному кроці відбувається заміна qam, t на $qr, t + eam, t$, де qr, t – еталонний (фактичний) кватерніон у момент t ; eam, t ітерації передбачення похибка, сформована похибкою в показниках акселерометра та магнітометра в момент t .

Отже, отримуємо:

$$q \nabla, t = at(qinit - qr, t - eam, t) + e \nabla, t. \quad (12)$$

Для порівняння методів рішення завдання орієнтації ЛА в просторі позначимо вектор корекції кватерніона $q \nabla, t$ для фільтра Маджвіка як $q_{\nabla, t}^M$, тоді вдосконалений фільтр позначимо як $q_{\nabla, t}^z$. Різниця між цими двома фільтрами полягає в тому, що С. Маджвік використовує оцінку орієнтації в момент $t-1$, тобто $qest, t-1$ для початкового прогнозування $qinit$ на етапі градієнтного спуску, тоді як у запропонованому підході використовується оцінка кватерніона гіроскопа в момент t , тобто

qg, t , для початкової оцінки $qinit$. Тому необхідно переписати вектори корекції кватерніона для двох фільтрів окремо, як показано нижче:

$$q_{V,t}^z = \alpha t (qg, t - qr, t - eam, t) + e\nabla, t ;$$

$$q_{V,t}^M = \alpha t (qest, t - 1 - qr, t - eam, t) + e\nabla, t.$$

Остання інтеграція та підсилення, застосовані до двох фільтрів, забезпечують такі виходи для запропонованого фільтра й оригінального фільтра Маджвіка відповідно:

$$q_{est,t}^z = qg, t - (\beta\Delta t) (\alpha t (qg, t - qr, t - eam, t) + e\nabla, t) \quad (13)$$

$$q_{est,t}^M = qg, t - (\beta\Delta t) (\alpha t (qest, t - 1 - qr, t - eam, t) + e\nabla, t) \\ = qg, t - (\beta\Delta t) (\alpha t (qr, t - 1 + eest, t - 1 - qr, t - eam, t) + e\nabla, t). \quad (14)$$

Отже, отримаємо **запропонований спосіб фільтрації на основі Маджвіка**

$$q_{est,t}^z = qr, t + eest, t - 1 + eg, t - (\beta\Delta t) (\alpha t (qr, t + eest, t - 1 - qr, t - eam, t) + e\nabla, t) \\ qr, t + (1 - \beta\Delta t) eest, t - 1 + (1 - \beta\Delta t) \alpha t (eg, t + \beta\Delta t (ateam, t - e\nabla, t)). \quad (15)$$

Оригінальний Фільтр Маджвіка:

$$q_{est,t}^M = qr, t + eest, t - 1 + eg, t - (\beta\Delta t) (\alpha t (qr, t - 1 + eest, t - 1 - qr, t - eam, t) + e\nabla, t) \\ qr, t + (1 - \beta\Delta t) \alpha t (eest, t - 1 + eg, t + \beta\Delta t (qr, t - qr, t - 1) + \beta\Delta t (ateam, t - e\nabla, t)). \quad (16)$$

Наведені вище два рівняння детально показують всі умови помилки, наявні на виході обох фільтрів. Похибка Маджвіка – це функція попередньої помилки, $eest, t - 1$ і зчитування даних гіроскопа eg, t – похибки, сформовані показниками акселерометра та магнітометра та їх кватерніонного наближення, тобто eam, t , залишкова похибка, якщо використовувати одиничну ступінь спуску на градієнт, тобто $e\nabla, t$, а також зміна орієнтації датчика щодо системи відліку датчика, тобто $(qr, t - qr, t - 1)$. Вибір більш високого коефіцієнта підсилення β для фільтра Маджвіка зменшує абсолютну похибку з попередньої оцінки, тобто $|eest, t - 1|$, але призведе до збільшення ефекту абсолютної похибки, $|qr, t - qr, t - 1|$ $|eam, t|$ та $|e\nabla, t|$, як показано в рівнянні (16).

Якщо порівняти рівняння (15) та (16), варто зауважити, що досягнута апроксимація функції помилки в рівнянні (15). По-перше, у рівнянні, якому відповідає зміна орієнтації, тобто $(qr, t - qr, t - 1)$ не існує. По-друге, термін помилки, наприклад, eg, t , яка походить від похибки показників гіроскопа та попередньої оцінки $qest, t - 1$, знижений до $(1 - \beta\Delta t) eg, t$.

Результати моделювання. Для перевірки ефективності запропонованого методу розроблена імітаційна модель у MatLab. Результат показаний на рис. 2.

На імітаційній моделі представлено три послідовних обертання датчиків ІНС постійної швидкості (1 рад / с) за 360° навколо кожної осі. Похибки акселерометра та магнітометра моделюються з нульовим середнім Гауссовським шумом зі стандартним відхиленням 0,03, що відповідає типовій похибці приблизно на 3 градуси. Для гіроскопа зі стандартним відхиленням 1 (рад/с).

Перевірено результат рішення кватерніона запропонованого методу з використанням даних ідеального акселерометра і магнітометра, отриманих шляхом обертання глобальних векторів (гравітації і магнітного поля) у локальній системі відліку з використанням орієнтування, розрахованого шляхом інтегрування кутового вектора швидкості, отримано аналогічні вихідні данні (рис. 2а). Необхідно зазначити, що із правого боку (рис. 2) під час обертання навколо осі y , крім зміни кута тангажу, також спостерігається миттєвий стрибок кутів повороту через зміну сингулярності, яка впливає на представлення кутів Ейлера. Однак, як показано на лівому боці рисунка, представлення кватерніона не пов'язане зі станом сингулярності, крім того, запропонований метод забезпечує безперервність кватерніона по всьому обертанню. На рис. 1б показано, що метод працює з даними шуму за прискоренням, у представленні Гауссовського шуму. Коли датчик близький до деякої конфігурації, де значення кута ризику є π або $-\pi$, через шум, ризику повертається між двома значеннями, які являють собою два альтернативних представлення того самого обертання. Моделюванням (рис. 2с) показано результат оцінки орієнтації з даних без шуму прискорення і даних магнітометра, на які впливають магнітні збурення. Із представлення орієнтації кутів Ейлера видно, що магнітні збурення впливають тільки на кут ризику.

Графік показує вихід орієнтації у формі кватерніона (ліворуч) і в поданні кутів Ейлера (праворуч); (а) – дані ідеального акселерометра і магнітометри, отримані шляхом обертання глобальних векторів (гравітації і магнітного поля) у локальній системі відліку; (б) – орієнтовний вихід представленою методу з даними прискорення і даними магнітометра; (с) – орієнтовний вихід представленою методу з даними без шуму прискорення і магнітними показниками, спричиненими магнітними збуреннями.

Як видно з таблиці 1, запропонований спосіб фільтра забезпечує кращу точність, ніж оригінальний фільтр Маджвіка.

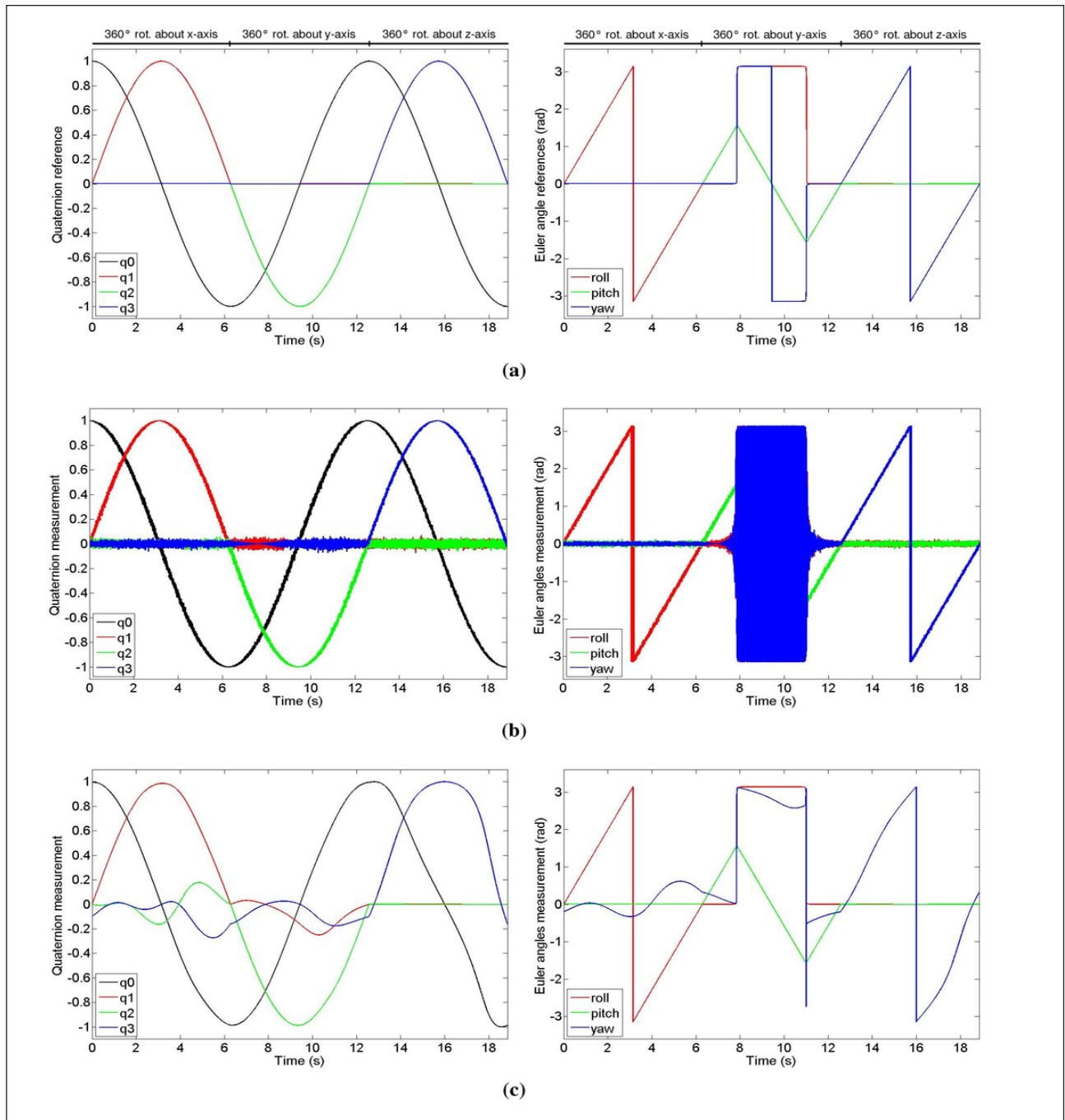


Рис. 2. Графіки імітації похибок ІНС із магнітометром на основі МЕМС-технології

Таблиця 1
Порівняння фільтрів орієнтації ІНС

Метод оцінки	Динамічна середньоквадратична похибка (рад/с)		
	Тангаж (pitch)	Крен (roll)	Рискання (yaw)
Фільтр Маджвіка ($\beta_{opt} = 0,021$)	1,9 371	0,3 502	1,8 198
Вдосконалений фільтр ($\beta_{opt} = 0,029$)	0,9 986 48,7%	0,2 410 33,12%	0,9 465 47,99%

Отже, запропонований фільтр зменшує час оброблення даних, які є в загальній похибці, і покращує точність з погляду як середньої квадратичної похибки, так і абсолютної похибки. Етап модифікації відбувається тоді, коли $|eg, t|$ збільшується, наприклад, коли гіроскопи демонструють меншу точність. Крім того, зміна курсу орієнтації $|qr, t - qr, t-1|$ збільшується еквівалентно (5), а отже, дані обробляються з більш високою точністю.

Висновки. У роботі розглянуті методи орієнтації ЛА в просторі на основі оригінального фільтру

тра Маджвіка і запропонованого вдосконаленого рішення, показано, що запропонований фільтр буде найкращим рішенням для дешевих інерціальних систем навігації на базі МЕМС.

Перевага в застосуванні фільтра для визначення орієнтації об'єкта в просторі полягає в здатності компенсувати магнітні спотворення (ферромагнітні дже-рела) та дрейф нуля гіроскопа в реальному часі, що дозволить мінімізувати помилки інерціальних датчи-

ків та підвищити стійкість системи навігації ЛА в автономному режимі польоту в динамічному середовищі.

У подальших дослідженнях побудови автономної навігації БПЛА для підвищення точності орієнтації ЛА в просторі разом із фільтрацією Маджвіка розглянемо можливість використання алгоритмів штучних нейронних мереж, що адаптуються до роботи, з огляду на результати попередніх вимірів системи навігації БПЛА.

Список літератури:

1. Madgwick S., Harrison A., Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm. IEEE ICORR, June 2011, P.1–7.
2. Купервассер О., Рубинштейн А. Система навігації беспилотных летательных аппаратов. Практика применения методических инструментов: IV конференция ТРИЗ. 2013. 14–20 с.
3. Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Коновалов С.Ф., Соловьева Т.И., Томилин А.В. Критерии выбора акселерометров для инерциального измерительного блока. Инновационные информационные технологии: материалы международной научно-практической конференции. НИУ ВШЭ. 2013. Т. 2. С. 372–378.
4. Матвеев В. Инженерный анализ погрешностей БИНС. Известия ТулГУ. 2014. № 9. С. 40–47.
5. Тимошенко С. Применение МЭМС-сенсоров в системах навигации и ориентации подвижных объектов. Национальный исследовательский университет МИЭТ. 2017. С. 23–30.
6. Горев П., Костиков В. Система высокоточной спутниковой навигации для управления процессами открытых горных работ. Научный вестник МГГУ. 2014. № 3 (48). С. 39–49.
7. Foxlin E. Inertial head-trackers en sor fusion by a complementary separate-biaskalman filter. Virtual Reality Annual International Symposium the IEEE 1996. P. 185–194, 267.
8. Marins J., Xiaoping Yun, Bachmann E., McGhee R., Zyda M. An extended Kalman filter for quaternion-based orientation estimation using marg sensors. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2001. Vol 4. P. 11–19.
9. Luinge H., Veltink P. Measuring orientation of human body segments using miniature gyroscopes and accelerometers. Medical and biological engineering and computing. 2006. № 43 (2). P. 273–282.
10. Phuong N., Kang H., Suh Y., Ro Y.-S. A DCM based orientation estimation algorithm with an inertial measurement unit and a magnetic compass. Journal of Universal computer science. 2009. № 15 (4). P. 859–876.
11. Hu J., Sun K. A Robust Orientation Estimation Algorithm Using MARG Sensors. IEEE transactions on instrumentation and measurement. 2015. Vol. 64. № 3. P. 815–822.
12. Beravs S., Begus J., Munih M. Magnetometer calibration using Kalman Filter covariance matrix for online estimation of magnetic field orientation. IEEE transactions on instrumentation and measurement. 2014. № 63–80. P. 2013–2020.
13. Choukroun D. Bar-Itzhack I. Oshman Y. Novel Quaternion Kalman Filter. IEEE trans. aerosp. electron. syst. 2006. № 42. P. 174–190.
14. Cavallo A., Cirillo P., Cirillo G. De Maria, Falco P., Natale C., Pirozzi S. Experimental comparison of sensor fusion algorithms for attitude estimation. World congress the International Federation of Automatic Control. Aug. 2014. P. 7585–7591.
15. Yanis F. et al. Simplified method for estimating the orientation of an object and attitude sensor implementing such a method». Patent WO2012168357 (A1). Dec.2012.
16. Sarbishei O., Radecka K. On the fixed-point accuracy analysis and optimization of polynomial specifications; IEEE Trans. OnCAD. 2013. Vol 32. № 6. P. 831–844.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЙ МЕТОД ОРИЕНТАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ С ПОМОЩЬЮ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ НА ОСНОВНЕ ФИЛЬТРА МАДЖВИКА

Фільтр займається обробкою масивов даних, поступаючих з датчиків, і вирішує проблеми точності і настройки параметрів фільтрів, основаних на підходах Калмана. Для представлення орієнтації використовується кватерніон, чтобы описать положение в пространстве в трех измерениях без проблем, связанных с описанием положения углами Эйлера (составление рамок). Задача состоит в вычислении единой оценки ориентации, полученной путем измерений акселерометра, гироскопа и магнитометра в реальном времени.

Ключевые слова: *оценка ориентации, инерционный блок измерения, магнитная угловая скорость и гравитация, кватернион, беспилотный летательный аппарат.*

**IMPROVED METHOD FOR ORIENTING UAVS IN THREE-DIMENSIONAL SPACE
WITH THE HELP OF MEMS INERTIAL NAVIGATION SYSTEM
ON THE BASIS OF THE MADGWICK FILTER**

The filter processes data arrays from sensors and eliminates the problems of accuracy and customization of filter settings based on Kalman's approaches. To represent the orientation, quaternion is used to describe the position in space in three dimensions and does not contain problems related to the description of the position of the Euler angles (hinged lock). The task is to calculate a single estimate of the orientation obtained by measuring the accelerometer, gyroscope and magnetometer in real time, which in turn increases the stability of the navigation system.

Key words: *orientation estimation, inertial measurement block, magnetic angular velocity and gravity, quaternion, unmanned aerial vehicle.*

УДК 656.7

Шевчук Д.О.

Національний авіаційний університет

Панчук Л.В.

Національний авіаційний університет

АНАЛІЗ І РОЗВИТОК СИСТЕМ ПОСАДКИ

На етап заходу на посадку і власне на посадку припадає найбільший відсоток авіаційних подій. Щоб забезпечити високий рівень безпеки польотів, на цьому етапі польоту впровадили більш жорсткі вимоги до точності навігаційних характеристик, а це призвело до встановлення дорогих радіотехнічних засобів навігації й посадки. Недоліком радіотехнічних систем є велика вартість їх обслуговування, не завжди є можливість їх оптимального розташування, що призводить до збільшення шуму в районі аеропорту та збільшення викидів продуктів згорання палива. Нині активно впроваджуються системи супутникової навігації, за допомогою яких стало можливим використання оптимальних схем заходу, які не прив'язані до наземних радіотехнічних засобів, а також стало можливим безступінчасте зниження літака з моменту сходження з ешелону до посадки. Особливо ця система актуальна в гірській місцевості, де лінія польоту, схеми заходу на посадку огинає гори, а оптимальне розташування радіотехнічних засобів не завжди можливе через рельєф місцевості.

Ключові слова: злітно-посадкова смуга, глісада, система посадки, повітряне судно, система супутникової навігації.

Постановка проблеми. Одна із найскладніших задач, яку повинен виконувати пілот повітряного судна (далі – ПС), – досягти плавної й безпечної посадки. На зорі авіації пілоти здійснювали посадку на відкритому полі, із будь-яким курсом, який давав їм найкращий напрямок відносно вітру. Але по мірі зростання трафіка, швидкості ПС, розвитку пасажирських перевезень з'явилася необхідність створення спеціально підготовлених посадкових майданчиків, які обладнані засобами посадки, щоб пілоти повітряного судна мали змогу визначити правильний курс і нахил перед посадковою прямою [2].

Із розвитком супутникової системи навігації (GNSS), в яку входять GPS і «ГЛОНАСС», Міжнародна організація цивільної авіації (далі – ІКАО) розробила концепцію зональної навігації, або навігації, заснованої на характеристиках (Performance Based Navigation (PBN)). Специфікація PBN є ключовим елементом, який визначає вимоги до повітряного простору й технічних засобів організації повітряного простору. Зокрема, PBN включає в себе специфікацію для кінцевого заходу на посадку на основі навігації, заснованої на GNSS (RNP APCH, RNP AR APCH, ADVANCED RNP) [1, с. 4]. За допомогою PBN

стало можливим здійснювати точний захід на посадку (І категорія ІКАО). Подальші статистичні дослідження, розвиток різних систем супутникової навігації («BeiDou», «Galileo»), а також розвиток системи диференціальної корекції повинні зменшувати метеомінімум до ІІІ категорії ІКАО.

Постановка завдання. Мета статті – проаналізувати розвиток систем посадки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Діючі системи й методи заходу на посадку.

Залежно від обладнання аеропорту (а також літака) розрізняють два типи заходу на посадку: інструментальний і неінструментальний, які поділяються за типом обладнання й методикою виконання схеми заходу (див. схему 1).

Точні заходи на посадку (глісада формується радіоелектронними засобами). Курсо-глісадна система (ILS) заснована на радіонавігаційних принципах роботи. Початок випробувань припадає на 1929 рік, у 1941 році Адміністрація цивільної авіації (CAA) дозволила встановлення системи в шести аеропортах. Перша посадка пасажирського авіалайнера з використанням системи була здійснена 26 січня 1938 року в США; так, літак компанії «Pennsylvania Central Airlines» Boeing 247-D вилетів із Вашингтона в Піттсбург і

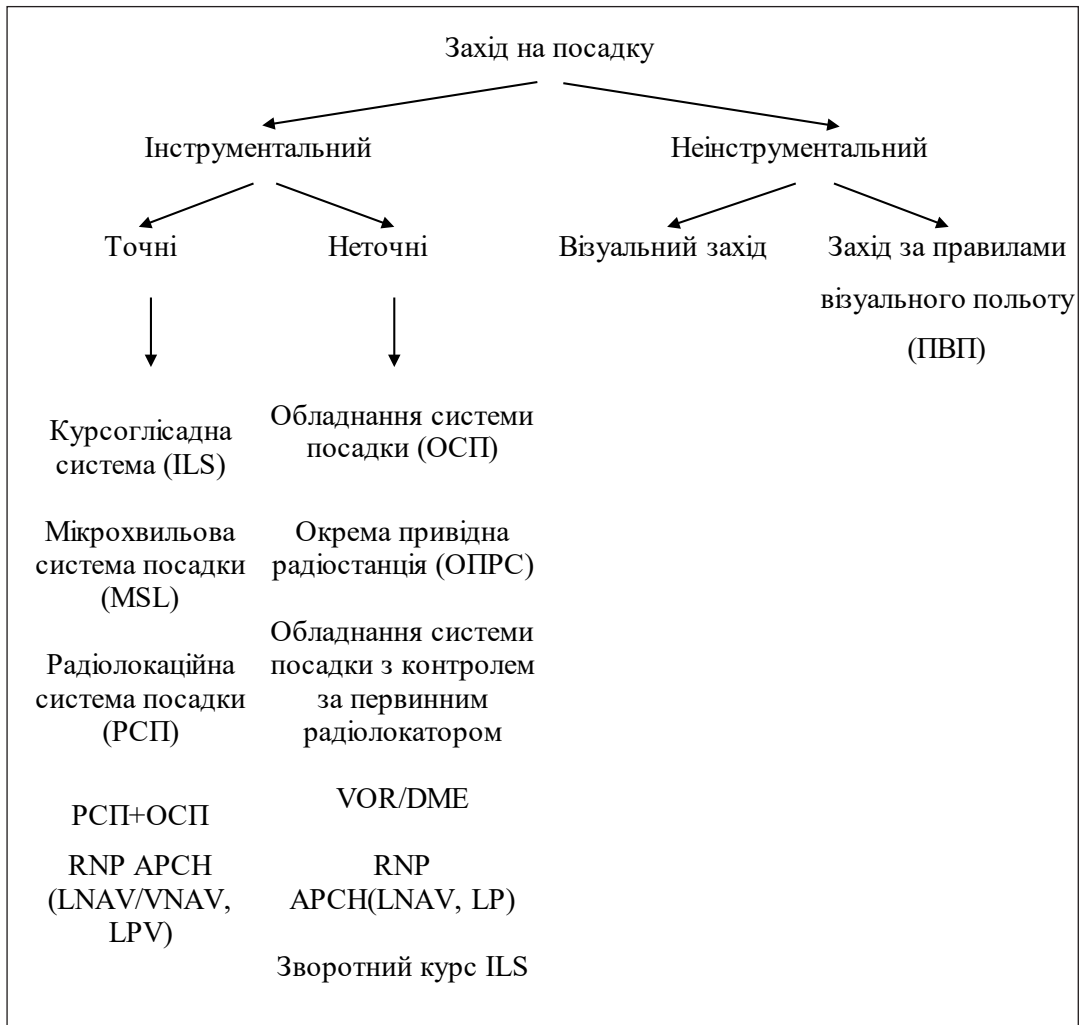


Схема 1. Методи заходу на посадку

здійснив посадку в заметіль, використовуючи лише систему ILS.

Було випробувано декілька типів систем ILS, і в результаті була прийнята система, що складалась із курсового радіомаяка, який показував положення літака відносно центральної лінії ЗПС, глісадного, який показував кут нахилу траєкторії, і двох маркерних маяків для контролю зниження літака по глісаді, а також відстані до порога ЗПС. Пілоту надавалася інформація, за якою він міг точно витримувати траєкторію польоту до візуального контакту із ЗПС. Світлосигнальні вогні й інше візуальне обладнання також допомагають пілоту контролювати положення літака під час посадки.

До 1945 року працювало дев'ять систем ILS, і ще 10 перебували на стадії будівництва. Ще 50 були встановлені для потреб армії. 15 січня 1945 року армія США представила ILS із більш високочастотним передатчиком, щоб створити більш точний напрямок польоту. У 1949 році ІКАО прийняла

ці армійські стандарти для всіх держав-членів. У 1960-х роках стало можливим перше обладнання ILS для повністю сліпих посадок [2].

ILS забезпечує захід на посадку за приладами системи посадки (ПСП), у директорному й автоматичному режимі. Залежно від сертифікації пілота й літака ILS може забезпечувати посадку при нульовій видимості (категорія ІІС ІКАО).

Мікрохвильова система посадки (MLS) була розроблена в 1980-х роках. На відміну від ILS, які використовують радіохвилі метрового діапазону, що схильні до сильного впливу інтерференції від перешкод і нерівностей рельєфу, системи MLS використовують радіохвилі з частотою 1 і 5 ГГц, що збільшило точність системи, а близько розташовані маяки не заважають роботі один одного, що зробило можливою реалізацію декількох каналів. MLS були прийняті в Європі в якості заміни ILS. Але в 1994 році в США FAA припинила подальший розвиток MLS на користь вико-

ристання технологій, які засновані на глобальній системі позиціонування (GPS) [1].

Радіолокаційна система посадки літального апарата (далі – ЛА) призначена для забезпечення посадки в простих і складних метеоумовах тих ЛА, які не мають спеціального посадкового обладнання, забезпечених тільки звичайними пілотажно-навігаційними приладами й радіозв'язком. За умови використання таких систем положення літака відносно ЗПС і глісади визначається за допомогою спеціального наземного посадкового радіолокатора (далі – ПРЛ). Посадка літака здійснюється за командами із землі, переданими екіпажу радіотелефоном.

У радіолокаційні системи посадки ЛА, крім засобів, що входять до складу спрощеної системи посадки, включене радіолокаційне обладнання, призначене для визначення операторами лінії планування під час виконання самої посадки.

Дані, одержані за допомогою посадкового радіолокатора, використовуються під час посадки літака для управління його рухом по лінії планування до висоти приблизно 20–30 м. Подальше зниження літака і його приземлення здійснюються за допомогою світлотехнічного обладнання спрощеної системи посадки й указівки помічника керівника польотами, що знаходиться на старті [2].

Унаслідок малої пропускної здатності (15–29 ЛА за годину) і складності управління посадкою ця система не знайшла масового застосування.

Точний захід на посадку RNP APCH (LNAV/VNAV, LPV). Із сертифікацією системи супутникової диференціальної корекції (SBAS) і наземної регіональної системи диференціальної корекції (GBAS), завдяки якій в 95% випадків точність визначення координат не перевищує 25 футів, стало можливим використовувати супутникову навігацію як основну систему-датчик для виконання точних заходів на посадку за категорією I ККАО.

Нині є два типи точних заходів, заснованих на концепції PBN:

1) RNP APCH (LPV) – визначення місцезнаходження в горизонтальній і вертикальній площинах за допомогою GNSS із корекцією за супутниковою системою диференціальної корекції (SBAS) чи наземною регіональною системою диференціальної корекції (GBAS);

2) LNAV/VNAV – визначення місця розташування в бічній площині за допомогою GNSS-корекції по SBAS чи GBAS, визначення місця розташування у вертикальній площині за допомогою вхідних барометричних даних.

Концепції заходу на посадку охоплюють усі ділянки заходу на посадку за приладами, тобто початковий, проміжний, кінцевий етапи та відхід на друге коло. Вони будуть усе частіше вимагати від специфікації RNP навігаційної точності 0,3–0,1 милі й нижче. Як правило, ці етапи польоту характеризують три види прикладних процесів RNP: схеми заходу на посадку за специфікацією RNP не потребують наявності дорогих наземних радіотехнічних засобів посадки; нові схеми замінюються чи використовуються в якості резервних для наявних схем, які засновані на різних технологіях; більш оптимальні схеми заходу, які неможливо було виконати під час використання радіотехнічних систем навігації й посадки [3, I-A-2-4].

PBN має низку переваг порівняно із заснованим на конкретних датчиках методом розроблення критеріїв повітряного простору й висоти польоту перешкод, а саме:

1) знижує потребу в технічному забезпеченні заснованих на конкретних датчиках маршрутів і схем, а також пов'язані із цим витрати;

2) усуває необхідність розроблення заснованих на конкретних датчиках операцій щоразу, коли з'являються нові навігаційні системи, що було б пов'язано з дуже великими витратами;

3) дозволяє підвищити ефективність використання повітряного простору (організація маршрутів, паливна ефективність і зниження шуму);

4) роз'яснює, яким чином використовуються системи RNAV і RNP;

5) спрощує для експлуатантів процес експлуатаційного затвердження шляхом надання обмеженого набору навігаційних специфікацій, призначених для глобального використання [3, ст. I-(IV)].

Робота NDB (ДПРМ + БПРМ, VOR) заснована на принципі вимірювання курсового кута (магнітного пеленга, радіала) наземної радіостанції/ПС. Захід за ОСП вимагає оснащення ПС спеціальним обладнанням (приймачем і індикатором автоматичного радіокомпаса (системи VOR)).

Під час проходження ДПРМ екіпаж контролює розрахункову висоту польоту, відстань до точки приземлення й готовність бортових систем до забезпечення польоту на кінцевому етапі заходу на посадку. Під час проходження БПРМ екіпаж контролює розрахункову висоту польоту й приступає до візуального етапу посадки. Зазначені об'єкти зазвичай розташовуються від торця ЗПС на такій відстані: ДПРМ – 4000 метрів, БПРМ – 1050 метрів. ОПРС зазвичай розміщений за схемою БПРМ і виконує ті самі функції. Максимальна дальність дії радіомаяків ДПРМ і

Неточні заходи на посадку.

Захід на посадку за ОСП. Спосіб заснований на застосуванні кутомірної навігаційної системи з використанням двох аеродромних привідних радіостанцій – ДПРМ + БПРМ (дальня привідна радіостанція – з маркерним радіомаяком ДПРМ, ближня привідна радіостанція – з маркерним радіомаяком БПРМ) або з використанням однієї аеродромної привідної радіостанції NDB (NDB – non-directional radio beacon (окрема привідна радіостанція ОПРС)). (Див. схему 2) Окремим випадком є захід на посадку із застосуванням кутомірного обладнання системи VOR/DME.

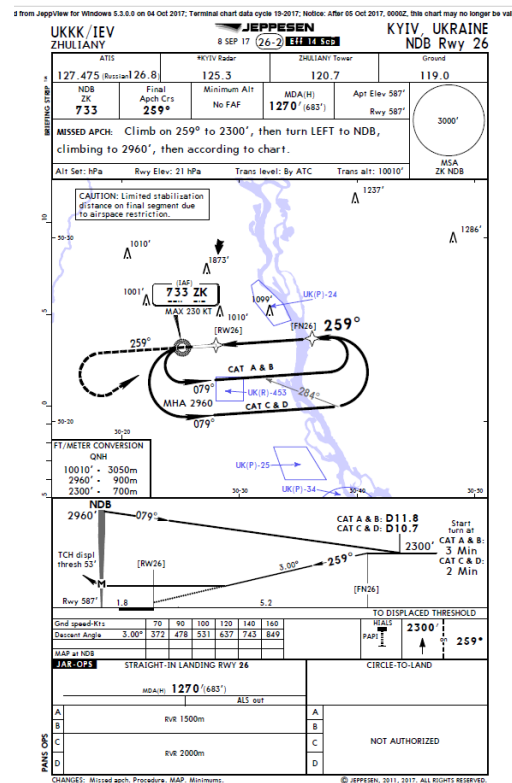


Схема 2. Приклад схеми заходу на посадку за ND

БПРМ – від 18,5 до 46,3 км, ОПРС – від 46,3 до 278 км.

Неточний захід на посадку за допомогою GNSS заснований на тому, що положення ПС у горизонтальній площині визначається супутниковою навігацією, а у вертикальній площині пілот сам контролює зниження ПС за висотоміром. Нині є два види неточних заходів, які входять у концепцію PBN:

- RNP APCH – LNAV – визначення місця розташування в бічній площині за допомогою GNSS (базове сузір'я);

- RNP APCH – LP – визначення місця розташування в бічній площині за допомогою SBAS.

Неінструментальний захід на посадку. Візуальний захід на посадку – захід на посадку, коли просторове положення повітряного судна і його місцезнаходження визначаються екіпажем візуально за природним горизонтом, земними орієнтирами, а також щодо інших матеріальних об'єктів і споруд.

Візуальний захід на посадку проводиться повітряним судном, що виконує політ за ППП (за приладами), якщо пілот візуально виявив аеродром, а диспетчер дозволив виконання візуального заходу на посадку. Конкретні значення метеоміні-

муму для візуального заходу на посадку можуть не встановлюватися, тому що все вирішується за ситуацією: якщо візуального контакту зі смугою немає, то й про виконання візуального заходу не йдеться.

Треба розуміти, що під час візуального заходу на посадку повітряного судна, що виконує політ за ППП, пілот не переходить на політ за ПВП. Це означає, що незважаючи на пілотування за візуальними орієнтирами, безпечні інтервали між повітряними суднами, що виконують візуальний захід на посадку, і іншими повітряними суднами продовжує забезпечувати авіадиспетчер. У цьому полягає основна відмінність візуального заходу на посадку від заходу на посадку за ПВП. Під час заходу на посадку за ПВП, як і взагалі під час польоту за ПВП, безпечні інтервали з іншими повітряними суднами забезпечують самі пілоти повітряних суден, що виконують політ за ПВП.

Висновки. Фактори, що впливають на вибір системи посадки (погодні умови в районі аеропорту, частота посадок і злетів, вартість заходу на посадку й злету), діють спільно. Вибір типу системи визначає висоту прийняття рішення, а отже, і метеомінімум, за якого аеропорт може приймати ПС. Для аеропортів із гарною погодою достат-

ною є система, що відповідає вимогам I категорії ICAO, для країн північно-західної частини Європи необхідна система, що відповідає вимогам III категорії ICAO.

Система точного заходу на посадку ILS залишається домінуючою, однак після аналізу затрат і вигод багато аеропортів будуть упроваджувати схеми заходу за специфікацією RNP, а саме за використанням GBAS/GLS (GBAS) і/або RNP AR із рівними чи кращими мінімумами. Хоча ILS не ідентифікується як компонент PBN, має місце гібридна побудова схеми заходу на посадку з

використанням «radius-to-fix» (RF) або «track-to-fix» (TF) із переходом на передпосадкову пряму по ILS. Авіалайнери будуть оснащені супутниковими приймачами точного заходу на посадку в якості базової авіоніки. Органи аеродрому визнають експлуатаційні переваги заходу на посадку за супутниковою навігацією перед ILS.

Сьогодні точний захід на посадку за специфікацією RNP забезпечує еквівалент можливостей I категорії ICAO, а подвійна частота SBAS із декількома супутниковими сузір'ями підвищить надійність системи [4, с. 10–11].

Список літератури:

1. План внедрения навигации, основанной на характеристиках PBN, в воздушном пространстве Российской Федерации. Москва, 2014 .
2. History of Aircraft Landing Aids. URL: https://www.centennialofflight.net/essay/Government_Role/landing_nav/POL14.htm.
3. Руководство по эксплуатационному утверждению навигации, основанной на характеристиках PBN. Doc 9997 ICAO. Издание первое. 2013.
4. Performance-Based Navigation for ANSPs: Concept 2030, Copyright CANSO 2017.

АНАЛИЗ И РАЗВИТИЕ СИСТЕМ ПОСАДКИ

На этап захода на посадку и саму посадку приходится наибольший процент авиационных происшествий. Чтобы обеспечить высокий уровень безопасности полетов, на этом этапе полета внедрились более жесткие требования к точности самолетовождения, что привело к установке дорогих радиотехнических средств навигации и посадки. Недостатком радиотехнических систем является их большая стоимость обслуживания, и не всегда есть возможность их оптимального расположения, что приводит к увеличению шума в районе аэропорта и к увеличению выбросов продуктов сгорания топлива. Сегодня активно внедряется система спутниковой навигации, с помощью которой стало возможным использование оптимальных схем захода, не привязанных к наземным радиотехническим средствам, а также стало возможным бесступенчатое снижение самолета с момента схода с эшелона до посадки. Особенно эта система актуальна в горной местности, где линия полета, схемы захода на посадку огибает горы, а оптимальное расположение радиотехнических средств не всегда возможно из-за рельефа местности.

Ключевые слова: взлетно-посадочная полоса, глиссада, система посадки, воздушное судно, система спутниковой навигации.

ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF LANDING SYSTEMS

At the approach and landing phase, the largest percentage of accidents occur. In order to ensure a high level of flight safety, for this phase of the flight, more stringent navigation accuracy requirements are required. This led to the establishment of expensive radio navigation and landing systems. The disadvantage of radio navigation systems is their high maintenance costs and there is not always the possibility of their optimal location, which leads to increased noise in the airport area and an increase in emissions of combustion products. For today, Global navigation satellite systems are being implemented, with the help of which it has become possible to use the optimal approach of the aircrafts, that they are independent on radio navigation system, and it became possible to continuous descent final approach. Especially, this system is relevant in the highlands, where the flight routes approach procedures, encircles the mountain and the optimal location of the radio navigation aids is not always possible.

Key words: runway, glide path, landing system, aircraft, GNSS.

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.3.07

Новогрецкий С.Н.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Подымака В.И.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

Прудников А.А.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

ГАРМОНИЧЕСКИЙ СОСТАВ ТОКА ТРЕХФАЗНОГО РЕАКТОРА ПРИ ПОПЕРЕЧНОМ ПОДМАГНИЧИВАНИИ ЯРМА

Рассмотрен трехфазный регулируемый реактор симметричной радиальной конструкции с поперечным подмагничиванием участков ярма. На основе схемы замещения магнитной системы произведен расчет гармонического состава магнитодвижущей силы основной обмотки в зависимости от интенсивности поперечного постоянного поля подмагничивания. На диапазон регулирования тока реактора оказывает существенное влияние относительная длина стыкового зазора и магнитная индукция, создаваемая основной обмоткой. Поперечное подмагничивание участков ярма неизменно приводит к увеличению процентного содержания гармоник в токе основной обмотки. Показано, что при неизменной во времени намагничивающей силе обмотки подмагничивания уровень гармоник в токе реактора значительно ниже, чем при неизменном магнитном потоке этой обмотки.

Ключевые слова: реактор, магнитопровод, намагничивающая сила, поперечное подмагничивание, гармонический состав.

Постановка проблемы. В энергосистемах применяются шунтирующие реакторы для компенсации зарядной мощности линий [1, с. 10], реакторы в составе фильтров для подавления высших гармоник, реакторы для регулирования емкостной мощности конденсаторных батарей с целью емкостного возбуждения и стабилизации напряжения асинхронных генераторов [2, с. 43]. При изменении режимов работы и конфигурации энергосистемы соответствующим образом должны меняться и индуктивные сопротивления реакторов.

Анализ последних исследований и публикаций. Известным способом регулирования тока реактора является продольное или поперечное подмагничивание его магнитной системы, что приводит к уменьшению магнитной проницаемости и, как следствие, к уменьшению индуктивного сопротивления [3, с. 18; 4, с. 29]. Для продольного

подмагничивания стержень магнитопровода реактора делится на две равные секции, которые подмагничиваются постоянным током в противоположных направлениях, что исключает наличие в суммарной намагничивающей силе обмотки переменного тока четных гармоник [5, с. 1; 6, с. 6]. Также известны конструкции аксиального симметричного реактора с подмагничиванием противоположно расположенных ярма в одном направлении, а также радиального симметричного шестистержневого реактора с расположением обмоток на трех стержнях и подмагничиванием ярма в одном направлении по окружности. Указанные конструкции позволяют скомпенсировать четные гармоники в токе обмотки, однако секционирование стержней и удвоение системы подмагничивания обмотками встречного включения значительно увеличивает массу активных материалов, а наличие прямой индуктивной связи

между основной обмоткой и обмотками управления приводит к повышению инерционности регулирования. Отмеченные недостатки отсутствуют в конструкциях с поперечным подмагничиванием [7, с. 1; 8, с. 2]. Известны конструкции трехфазных индукционных статических преобразователей и аппаратов с аксиальными симметричными магнитопроводами, в которых осуществляется поперечное подмагничивание стержней [9, с. 33]. Для уменьшения массогабаритных показателей предложено конструктивно разделять стержни на две симметричные секции с отверстиями для установки обмотки подмагничивания. Однако при этом увеличивается длина среднего витка и материалоемкость основной обмотки, охватывающей стержень. Также известна радиальная конструкция индукционного статического преобразователя, которая состоит из шести одинаковых секций [8, с. 2]. Обмотка подмагничивания охватывает внешнюю поверхность каждой секции магнитопровода и создает поперечное магнитное поле. Кроме увеличения материалоемкости основной обмотки, охватывающей смежные участки витых секций магнитопровода, недостатком данной конструкции является разомкнутый магнитопровод для потока подмагничивания, что способствует повышению мощности управления. Снижение материалоемкости обмоток и электромагнитной системы индукционного преобразователя возможно при замене поперечного подмагничивания стержней на подмагничивание ярма с использованием индукторов для замыкания магнитного потока в поперечном направлении.

При подмагничивании магнитопровода реактора процентное содержание высших нечетных гармоник в токе рабочей обмотки изменяется в зависимости от степени насыщения магнитопровода и может значительно превышать допустимые значения. Компенсацию высших нечетных гармоник можно осуществить путем параллельного подключения двух реакторов, основные обмотки которых имеют соединение либо треугольника и звезды, либо правого и левого зигзага с углом сдвига в 15° . В результате, 5-я и 7-я гармоники токов обеих обмоток находятся в противофазе и отсутствуют в токе, потребляемом из сети [1 с. 14; 3 с. 18]. Однако данное техническое решение требует наличия двух независимых магнитных систем и, как следствие, приводит к повышению массогабаритных показателей.

Более эффективным способом компенсации высших гармоник является поперечное подмагничивание переменным магнитным полем, при

котором результирующая магнитная индукция в подмагничиваемом участке магнитопровода в любой момент времени остается неизменной по величине. В этом случае магнитное сопротивление подмагничиваемого участка становится линейным, способствует линеаризации зависимости магнитодвижущей силы от магнитного потока и обеспечивает резкое снижение процентного содержания высших гармоник [10, с. 74].

Постановка задания. Целью работы – анализ гармонического состава магнитодвижущей силы основной обмотки трехфазного реактора с радиальным симметричным магнитопроводом при поперечном подмагничивании ярма постоянным магнитным полем.

Изложение основного материала исследования. Конструкция рассматриваемого реактора с радиальным симметричным магнитопроводом и поперечным подмагничиванием ярма представлена на рисунке 1.

Магнитопровод реактора состоит из трех витых секций 1, которые при совмещении образуют радиальную симметричную конструкцию. Фазы основной трехфазной обмотки 2 охватывают смежные участки – стержни витого магнитопровода. Обмотка подмагничивания 3 располагается на индукторе 4, который, имея вид скобы, охватывает внешнюю часть магнитопровода и замыкает магнитный поток подмагничивания в поперечном направлении по отношению к магнитному потоку основной обмотки.

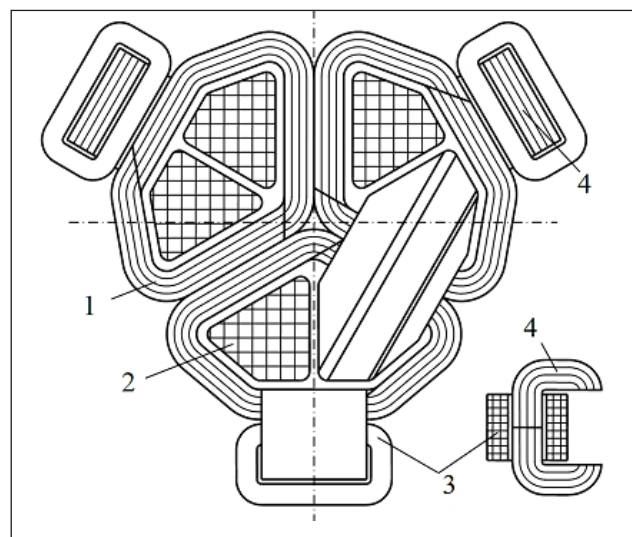


Рис. 1. Конструкция трехфазного реактора с поперечным подмагничиванием

Анализ работы реактора (рис. 1) выполняется по упрощенной схеме замещения магнитной цепи (рис. 2).

На рис. 2 указаны следующие обозначения: R_δ и $R_{n\delta}$ – магнитное сопротивление стыкового зазора в секции магнитопровода и индуктора; l_m, l_n и l_δ – длины неподмагничиваемого и подмагничиваемого участков секции, а также величина стыкового зазора; μ_n и μ_n – значения магнитной проницаемости неподмагниченной и подмагниченной частей секции; $B(t)$ – значение индукции в магнитопроводе в момент времени t ; $B_n(t)$ – магнитная индукция поперечного поля подмагничивания; $F_{yo}(t)$ – удельное значение намагничивающей силы на единицу длины.

Представленной схеме замещения соответствует система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 (R_n + R_n + R_\delta) &= F_a - F_b = F_1; \\ \Phi_2 (R_n + R_n + R_\delta) &= F_b - F_c = F_2; \\ \Phi_3 (R_n + R_n + R_\delta) &= F_c - F_a = F_3. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Предположим, что обмотки переменного тока реактора создают синусоидальные магнитные потоки:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_A &= \Phi_m \sin(\omega t) = \Phi_1 - \Phi_3; \\ \Phi_B &= \Phi_m \sin(\omega t - \pi/3) = \Phi_2 - \Phi_1; \\ \Phi_C &= \Phi_m \sin(\omega t - 2\pi/3) = \Phi_3 - \Phi_2. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

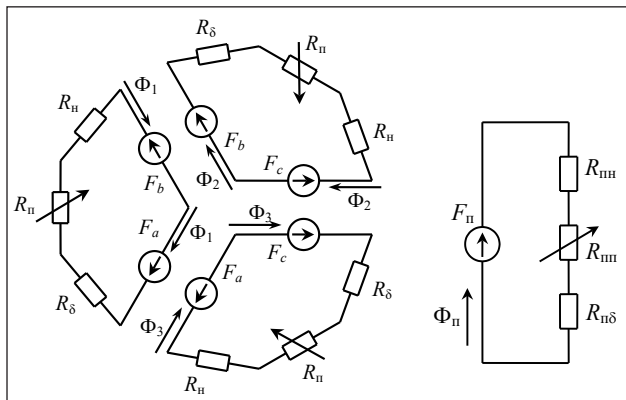


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи

В этом случае, в соответствии с системами уравнений (1) и (2), при насыщении магнитной цепи возникают нечетные гармоники, за исключением кратных трем, в намагничивающих силах F_1, F_2, F_3 , а также нечетные гармоники кратных трем в магнитных потоках секций Φ_1, Φ_2, Φ_3 .

Уравнение связи между магнитным потоком и намагничивающей силой для одной секции магнитопровода можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} F_1(t) &= \Phi_1(t)(R_n + R_n + R_\delta) = \\ &= B(t) l \left(\frac{l_n/l}{\mu_n(B(t))} + \frac{l_n/l}{\mu_n(B(t), B_n(t))} + \frac{l_\delta/l}{\mu_0} \right); \\ F_{yn}(t) &= B(t) \left(\frac{l_n/l}{\mu_n(B(t))} + \frac{l_n/l}{\mu_n(B(t), B_n(t))} + \frac{l_\delta/l}{\mu_0} \right); \\ F_{yn}(t) &= \frac{F_1(t)}{l}; \quad B(t) = \frac{\Phi_1(t)}{S}, \end{aligned}$$

где l и S – длина и площадь поперечного сечения секции магнитопровода; l_m, l_n и l_δ – длины неподмагничиваемого и подмагничиваемого участков секции, а также величина стыкового зазора; μ_n и μ_n – значения магнитной проницаемости неподмагниченной и подмагниченной частей секции; $B(t)$ – значение индукции в магнитопроводе в момент времени t ; $B_n(t)$ – магнитная индукция поперечного поля подмагничивания; $F_{yo}(t)$ – удельное значение намагничивающей силы на единицу длины.

При использовании изотропной стали магнитные проницаемости μ_n и μ_n определяются по соотношению результирующих значений магнитной индукции к напряженности магнитного поля в рассматриваемом участке магнитопровода:

$$\mu_n(B(t)) = \frac{B(t)}{H(B(t))};$$

$$\mu_n(B(t), B_n(t)) = \frac{\sqrt{B(t)^2 + B_n(t)^2}}{H(\sqrt{B(t)^2 + B_n(t)^2})},$$

где $H(B)$ – напряженность магнитного поля, соответствующая магнитной индукции B и определенная по основной кривой намагничивания.

Такое же уравнение можно получить и для магнитной цепи поперечного подмагничивания:

$$\begin{aligned} F_n &= \Phi_n(t)(R_{nn} + R_{nn} + R_{n\delta}) = \\ &= B_n(t) l_n \left(\frac{l_{nn}/l_n}{\mu_n(B_n(t))} + \frac{l_{nn}/l_n}{\mu_n(B(t), B_n(t))} + \frac{l_{n\delta}/l_n}{\mu_0} \right); \\ F_{yn} &= B_n(t) \left(\frac{l_{nn}/l_n}{\mu_n(B_n(t))} + \frac{l_{nn}/l_n}{\mu_n(B(t), B_n(t))} + \frac{l_{n\delta}/l_n}{\mu_0} \right), \end{aligned}$$

где l_n и S_n – длина и площадь поперечного сечения секции магнитопровода индуктора; l_{nn}, l_{nn} и $l_{n\delta}$ – длины неподмагничиваемого индуктора и высота подмагничиваемого участка секции, а также величина стыкового зазора; F_{yodn} – удельное значение намагничивающей силы подмагничивающей обмотки на единицу длины.

Разработана программа, которая по амплитуде B_{m1} первой гармоники $B(t)$ итерационным методом подбирает значения амплитуд третьей B_{m3} и девятой B_{m9} гармоник, при которых в намагничивающей силе $F_{yo}(t)$ такие составляющие отсутствуют. Расчет гармоник осуществляется по дискретному преобразованию Фурье при количестве расчетных точек на период 200. В расчетах использовались характеристики холоднокатаной изотропной стали марки 2412, основная кривая намагничивания которой была задана с помощью линейной интерполяции по табличным данным. Программа также содержит подпрограмму, которая для задан-

Таблица 1

Результаты расчетов при $B_{подм} = const$

Исходные данные	$l_n/l = 0,8; l_n/l = 0,2; l_{ин}/l_n = 0,7; l_{ин}/l_n = 0,3$								
	$l_8/l = l_{п8}/l_n = 10^{-5}$					$l_8/l = l_{п8}/l_n = 10^{-4}$			
	B_n , Тл	B_{m1} , Тл	B_{m3} , %	F_{m1} , А/см	F_{m5} , %	F_{m7} , %	B_{m3} , %	F_{m1} , А/см	F_{m5} , %
0	1	1,36	9,74	0,43	0,02	0,17	81,4	0,06	0
1	1	4,26	10,5	0,92	0,04	0,66	82,3	0,22	0,03
1,4	1	11,6	17,3	3,93	0,77	3,36	89,8	0,2	0,13
1,6	1	10,3	26,9	4,02	0,54	3,85	99,3	0,27	0,12
1,8	1	16	56	11,7	5,23	11,6	132	1,35	1,92
0	1,4	4,49	13,5	0,64	0,19	0,71	107	0,2	0,01
1	1,4	13,0	20,2	4,75	2,1	4,37	123	1	0,06
1,4	1,4	14,7	39,4	10,3	0,47	7,01	142	0,81	0,09
1,6	1,4	17,2	78,6	21,5	9,7	13,9	188	4,18	3,64
1,8	1,4	18,1	245,3	20,4	2,4	15,7	348	12,6	0,7

ного значения $B(t)$ и F_{yon} рассчитывает итерационным методом мгновенное значение $B_n(t)$.

Рассмотрим два основных режима подмагничивания поперечным магнитным полем. В одном из них пусть сохраняется постоянство магнитной индукции поля подмагничивания ($B_{подм} = const$), а во втором – постоянство намагничивающей силы обмотки подмагничивания ($F_{yon} = const$).

В таблице 1 представлены расчетные данные, полученные для случая $B_{подм} = const$. Амплитуды пятой F_{m5} и седьмой F_{m7} гармоник намагничивающей силы $F_{yo}(t)$ представлены в процентах по отношению к амплитуде первой гармоники F_{m1} . Аналогично представлена третья гармоника B_{m3} магнитной индукции $B(t)$ в процентах по отношению к B_{m1} .

По полученным результатам можно сделать определенные выводы. Во-первых, путем поперечного подмагничивания ярма в рассматриваемой конструкции реактора можно обеспечить широкий диапазон регулирования индуктивности основной обмотки (например, при $B_{m1} = 1,4$ Тл, $l_n/l = 0,2$ и $l_8/l = 10^{-5}$ изменение $B_{подм}$ от 0 до 1,8 Тл вызывает увеличение удельной намагничивающей силы F_{m1} , а значит, и тока основной обмотки, в 18,2 раза). Во-вторых, при уменьшении удельной длины стыкового зазора l_8/l расширяется диапазон регулирования индуктивности и увеличивается процентное содержание гармоник как в намагничивающей силе основной обмотки, так и в магнитном потоке секции магнитопровода (увеличение относительной длины стыкового зазора l_8/l от 10^{-5} до 10^{-4} привело к уменьшению кратности изменения F_{m1} в 3,5...6,5 раз). В-третьих, эффективность регулирования увеличивается при увеличении амплитуды первой гармоники магнитной индукции B_{m1} (увеличение B_{m1} с 1 Тл до 1,4 Тл

привело к увеличению кратность изменения F_{m1} в 2...3,3 раза). В-четвертых, при подмагничивании постоянным полем в токе основной обмотки пятая гармоника может достигать 21%, а седьмая гармоника – 9%, что является неприемлемым последствием нелинейности магнитной системы.

Рассмотрим режим $F_{yon} = const$, который рассчитывается сложнее ввиду изменения во времени $B_{подм}$, однако на практике реализуется значительно проще, так как он предполагает постоянство тока в обмотке подмагничивания. В таблице 2 представлены результаты расчета для данного режима.

Сопоставив данные в обеих таблицах, можно убедиться, что в случае поддержания постоянной намагничивающей силы обмотки подмагничивания наблюдается значительное снижение процентного содержания пятой и седьмой гармоник в токе фазной обмотки. Это обусловлено тем, что при геометрическом сложении продольного и поперечного полей будут иметь место максимум и минимум суммарной магнитной индукции. При максимуме будет наблюдаться снижение магнитной проницаемости подмагничиваемого участка и уменьшение магнитного потока подмагничивания, а при минимуме магнитный поток будет увеличиваться. В результате, при поддержании постоянства намагничивающей силы обмотки подмагничивания (а значит, и постоянства тока, протекающего через нее) магнитный поток подмагничивания будет меняться с двойной частотой, причем максимум переменной составляющей будет соответствовать нулевому значению продольного магнитного потока от основной обмотки. Как показано в [10, с. 75], такая переменная составляющая способствует уменьшению гармоник, а при определенной амплитуде вообще позволяет избавиться от них.

Результаты расчетов при $F_{ydn} = const$

Исходные данные		$I_r/l = 0,8; I_{r1}/l = 0,2; I_{r2}/l = 0,7; I_{r3}/l = 0,3$							
		$I_{r6}/l = I_{r8}/l = 10^{-5}$				$I_{r6}/l = I_{r8}/l = 10^{-4}$			
$F_{удп}, A/cm$	$B_{m1}, Tл$	$B_{m3}, \%$	$F_{m1}, A/cm$	$F_{m5}, \%$	$F_{m7}, \%$	$B_{m3}, \%$	$F_{m1}, A/cm$	$F_{m5}, \%$	$F_{m7}, \%$
0	1	1,36	9,74	0,43	0,02	0,17	81,4	0,06	0
75	1	8	24,7	2,41	0,32	0,42	81,9	0,14	0,04
175	1	8,52	38,0	2,25	0,03	2,81	95,2	0,22	0,002
300	1	11,1	69,3	5,41	0,54	3,97	110,5	0,074	0,088
0	1,4	4,49	13,5	0,64	0,19	0,71	107	0,2	0,01
75	1,4	11,3	45,1	5,02	0,43	3,01	120	0,8	0,73
175	1,4	14,4	82,8	8,9	0,41	5,37	145,8	0,51	0,09
300	1,4	13,1	138,4	7,81	1,24	9,58	189,5	2,5	0,82
500	1,4	10,9	220,5	5,5	1,45	9,4	273,6	3,51	0,56

Выводы:

1. Конструкция трехфазного реактора с радиальным симметричным магнитопроводом и поперечным подмагничиванием ярма позволяет получить регулирование индуктивности в широком диапазоне.

2. Эффективность регулирования увеличивается при повышении амплитуды первой гармоники магнитной индукции поля основной обмотки B_{m1} и уменьшении величины стыкового зазора l_8 .

3. Режим постоянства намагничивающей силы обмотки подмагничивания сопровождается значительно меньшими уровнями гармоник в токе реактора, чем в режиме постоянства магнитного потока подмагничивания.

4. Режим постоянства намагничивающей силы легко реализуем при соединении обмоток подмагничивания, принадлежащих разным фазам, последовательно. В результате, сумма ЭДС, наводимых в обмотках переменной составляющей магнитного потока подмагничивания, будет равна нулю, и влияние обмоток на источник питания будет минимальным.

5. Усиление переменной составляющей магнитного потока подмагничивания может позволить еще больше уменьшить процентное содержание высших гармоник в намагничивающей силе фазной обмотки реактора.

Список литературы:

1. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы / М.В. Дмитриев, А.С. Карпов, Е.Б. Шескин, А.Г. Долгополов, Д.В. Кондратенко; под ред. Г.А. Евдокунина. СПб.: Родная Ладога, 2013. 280 с.
2. Торопцев Н.Д. Асинхронные генераторы для автономных электроэнергетических установок. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2004. 88 с.
3. Соколов С.Е., Долгополов А.Г. Управляемые реакторы. Обзор технологий. Новости электротехники: информационно-справочное издание. СПб., 2012. Вып. 3 (75). С. 18–22.
4. Цыганов С.И., Кондратенко Д.В. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы как средство повышения эффективности работы электроэнергетических систем. ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. М.: Электрозавод, 2008. № 1. С. 28–32.
5. Электрический реактор з підмагнічуванням: пат. 104244 Україна: МПК H01F 27/26, H01F 29/14. № а201213911; заявл. 18.02.2011; опубл. 10.01.2014, Бюл. №1. 9 с.
6. Брянцев А.М. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы: сборник статей / под редакцией А.М. Брянцева. М.: Знак, 2010. 288 с.
7. Трансформатор-перетворювач з поперечним підмагнічуванням змінним струмом: пат. 79028 Україна: МПК H01F 29/00. № а200505669; заявл. 13.06.2005; опубл. 10.05.2007. Бюл. № 6. 3 с.
8. Електромагнітна система з регулюванням підмагнічуванням: пат. 70866 Україна: МПК H01F 29/00. № 20031213110; заявл. 30.12.2003; опубл. 15.10.2004. Бюл. № 10. 3 с.
9. Ставинский А.А., Ставинский Р.А., Платирь О.О. Способы обеспечения специальных требований к силовому электрооборудованию на основе трансформаторов и трансформаторных преобразователей с пространственной структурой активной части. Електротехніка і електромеханіка. Х.: НТУ ХПІ, 2005. Вып. 4. С. 30–36.
10. Ставинский А.А., Новогрецкий С.М., Прудников А.А. Трехфазный реактор с радиальным магнитопроводом, управляемый поперечным подмагничиванием ярма. Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал. Кременчук, КрНУ, 2016. Вып. 2/2016 (34). С. 71–77.

ГАРМОНІЙНИЙ СКЛАД СТРУМУ ТРИФАЗНОГО РЕАКТОРА ЗА ПОПЕРЕЧНОГО ПІДМАГНІЧУВАННЯ ЯРМА

Розглянуто трифазний регульований реактор симетричної радіальної конструкції з поперечним підмагнічуванням ділянок ярма. На основі схеми заміщення магнітної системи зроблений розрахунок гармонійного складу магніторушійної сили основної обмотки залежно від інтенсивності поперечного постійного поля підмагнічування. На діапазон регулювання струму реактора впливає відносна довжина стикового зазору і магнітна індукція, створювана основною обмоткою. Поперечне підмагнічування ділянок ярма незмінно приводить до збільшення процентного вмісту гармонік у струмі основної обмотки. Показано, що за незмінної в часі сили обмотки підмагнічування, що намагнічує, рівень гармонік у струмі реактора значно нижчий, ніж за незмінного магнітного потоку цієї обмотки.

Ключові слова: реактор, магнітопровід, намагнічуюча сила, поперечне підмагнічування, гармонійний склад.

THE CURRENT HARMONIC STRUCTURE OF THE THREE-PHASE REACTOR WITH THE YOKE TRANSVERSE MAGNETIC BIASING

A three-phase controlled reactor with a symmetrical radial structure with transverse magnetic biasing of the yokes sections is considered. Based on the magnetic system equivalent scheme, the harmonic structure of the main winding magnetomotive force as a function of the intensity of the transverse constant magnetizing field is calculated. The reactor current control range is significantly influenced by the relative length of the magnetic gap and magnetic induction, which is created by the main winding. The transverse magnetic biasing of the yokes sections permanently leads to the harmonics percentage increase in the main winding current. It is shown that with the bias winding magnetizing force constant in time, the reactor current harmonics level is much lower than with the constant magnetic flux of this winding.

Key words: reactor, magnetic circuit, magnetizing force, transverse bias, harmonic structure.

ПРИЛАДИ

УДК 528.563

Ткачук А.Г.

Житомирський державний технологічний університет

Безвесільна О.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

БУДОВА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ НОВОГО ПРЕЦИЗИЙНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ

Проаналізовано склад та призначення автоматизованих систем стабілізації. Розглянуто класичну систему непрямої стабілізації та систему стабілізації авіаційних гравіметричних систем. Проаналізовано наявні сьогодні види чутливих елементів систем стабілізації. Описано будову та принцип роботи нового прецизійного чутливого елемента для системи стабілізації, що має вищу, ніж у відомих аналогів, точність.

Ключові слова: стабілізатор, п'єзоелемент, чутливий елемент, похибка, регулювання.

Постановка проблеми. Системи стабілізації – це один із типів систем автоматичного керування, які призначені для підтримання постійного значення керованої величини із заданою точністю. Сьогодні ці системи використовуються для стабілізації об'єктів фотокамер, вимірювальних осей наземних та авіаційних гравіметричних систем, а також у військовій сфері для стабілізації озброєння.

Під час військових конфліктів найбільші втрати легкої броньованої техніки є наслідком використання малоефективних систем стабілізації та наведення озброєння. Наявні сьогодні системи стабілізації не можуть достатньо ефективно виконувати поставлені завдання через малу швидкість та точність їхніх чутливих елементів.

Сьогодні нові комплекси (системи) стабілізації та її чутливі елементи, розроблені науковцями НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Житомирського державного технологічного університету в співпраці з ПАТ «НВО «Київський завод автоматики», не потребують закордонних комплектуючих та, порівняно з аналогами, мають невисоку собівартість [1, с. 10].

Тому актуальною науково-технічною проблемою є розроблення нових та підвищення точності наявних чутливих елементів систем стабілізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

У роботі [1, с. 166] побудовано схематичні моделі та проведено моделювання п'єзоелектричних одноканальних перетворювачів із додатковими електричними коливальними контурами, які можуть бути використані як чутливий елемент стабілізатора озброєння. Використання таких моделей дозволяє за допомогою прикладних програм проводити оцінку характеристик і прогнозування параметрів і режимів роботи п'єзоелектричних перетворювачів. Проте отримані результати не можуть бути доказом того, що датчик такої конструкції має вищу точність, ніж в аналогів, оскільки не розглянуто двоканальні схеми компенсації похибок вимірювання.

У роботі [2, с. 112] виконано синтез нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкої броньованої техніки. Однак не розглянуто доцільність використання нейромережевого підходу для компенсації інструментальних похибок.

У роботах [3, с. 56; 4, с. 2] запропоновано за чутливий елемент системи стабілізації використовувати коріюлісовий вібраційний гіроскоп. Проаналізовано склад і принцип роботи відомої системи ударо- і віброзахисту навігаційного комплексу легкої броньованої техніки. Однак відсутні

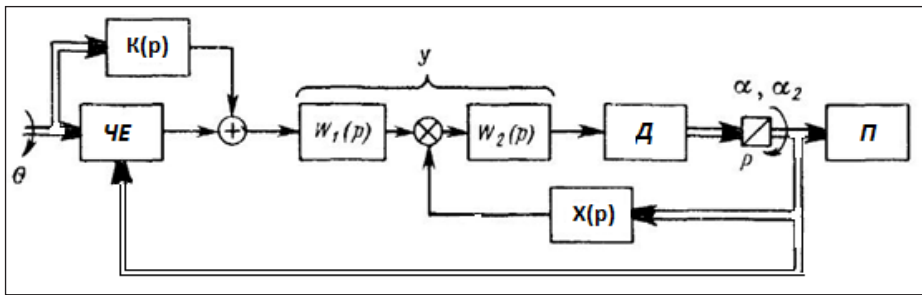


Рис. 1. Блок-схема системи непрямої стабілізації

пропозиції з покращення технічних характеристик системи, аналіз математичної моделі та похибок чутливих елементів системи.

У статті [5, с. 9] проведено розрахунок та аналіз статичних похибок двогіроскопного чутливого елемента. Проте не порівняно його точність із наявними аналогами.

Постановка завдання. Система стабілізації у військовій галузі – це система, що здійснює стабілізацію прицілювання зброї під час переміщення платформи, на якій цю зброю встановлено. Вона призначена для спрощення прицілювання під час руху броньованих машин і підвищення точності вогню, є частиною системи керування вогнем. Технічно являє собою набір датчиків і обчислювальний комплекс, з'єднаний із приводом гармати. На підставі показників датчиків визначаються параметри переміщення платформи і видаються керуючі команди приводу гармати, який компенсує відхилення.

Як систему стабілізації в статті розглянуто систему автоматичного керування, що забезпечує збереження певної кутової орієнтації башти стосовно системи координат, осі якої певним чином орієнтовані в просторі. Ця система координат є опорною. Залежно від конкретного завдання це може бути, наприклад, інерціальна система координат або система, осі якої спрямовані по вертикалі місця, де розташований об'єкт, що рухається.

Система стабілізації забезпечує сталість кутів між осями нерухомої системи координат і осями, жорстко зв'язаними з об'єктом стабілізації, який надалі буде називатися стабілізуючою платформою [1, с. 23].

Мета статті – розробити структурну схему та надати принцип роботи нового прецизійного чутливого елемента системи стабілізації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Класична система стабілізації складається із платформи, що стабілізується, чутливого елемента (або блока чутливих елементів), що визначає абсолютний кут повороту платформи α , підсилювача

вихідного сигналу чутливого елемента, двигунів і тахогенераторів.

Блок-схема класичної системи непрямої стабілізації представлена в [6, с. 106] та приведена на рис. 1, де ЧЕ – чутливий елемент; П – підсилювач; Д – двигун; Р – редуктор; П – стабілізована плат-

форма; $W_1(p)$ і $W_2(p)$ – передатні функції блоків підсилювача разом із засобами для корекції; $X(p)$ – передатна функція ланцюга сигналу за похідними кута повороту α_2 платформи щодо коливального об'єкта, $\lim_{p \rightarrow 0} X = 0$; $K(p)$ – передатна функція ланцюга сигналу за похідними кута коливання θ , $\lim_{p \rightarrow 0} K = 0$.

Диференційні рівняння системи непрямої стабілізації мають такий вигляд [6, с. 106]:

$$\left. \begin{aligned} J_0 p^2 \alpha + J_d n p^2 [(-1)^t \theta - n \alpha_2] &= M_B - n M_D; \\ M_D &= k_d U - s n p \alpha_2; \\ U &= W_y(p) \left[k_{u.e} \alpha - \frac{X(p)}{W_1(p)} \alpha + K(p) \theta \right]; \\ \alpha &= 0 - \alpha_2. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Де J_0 – момент інерції платформи, приведений до осі стабілізації; J_d – момент інерції ротора двигуна з редуктором, приведений до осі двигуна; n – передатне число редуктора, що має і пар зубчастих передач; M_B – сумарний момент збуренні від впливу моменту сухого тертя; M_D – момент стабілізуючого двигуна; U – напруга управління стабілізуючого двигуна; k_d і s – коефіцієнти, що характеризують стабілізуючий двигун; $k_{u.e}$ – коефіцієнт передачі чутливого елемента; $W_y(p) = W_1(p) W_2(p)$.

У роботі [7, с. 52] наведено приклад системи стабілізації, яку рекомендовано використовувати в складі авіаційних гравіметричних систем. У цій системі горизонтальна стабілізована платформа (далі – ГСП) має у своєму складі два лінійні акселерометри та виконавчі механізми у вигляді спеціальних двигунів (рис. 2).

Система стабілізації працює так. Вихідні сигнали лінійних акселерометрів f_y , f_x , установлених на ГСП, орієнтованій у географічній системі координат, осі чутливості яких спрямовані на північ та на схід відповідно, матимуть вигляд [7, с. 51]:

$$\begin{aligned} f_x &= -(2\dot{r}\dot{\phi}_c + r\ddot{\phi}_c) \cos \chi + (\ddot{r} - r\dot{\phi}_c^2) \sin \chi - 2r\omega_3 \lambda \cos \phi_c \\ &\sin \phi - r\lambda \cos \phi_c \sin \phi + \aleph g; \end{aligned} \quad (2)$$

$$f_y = 2r\dot{\phi}_3 \omega_3 \sin \phi_c + 2r\dot{\phi}_c \lambda \sin \phi_c - 2\dot{r}\lambda \cos \phi_c$$

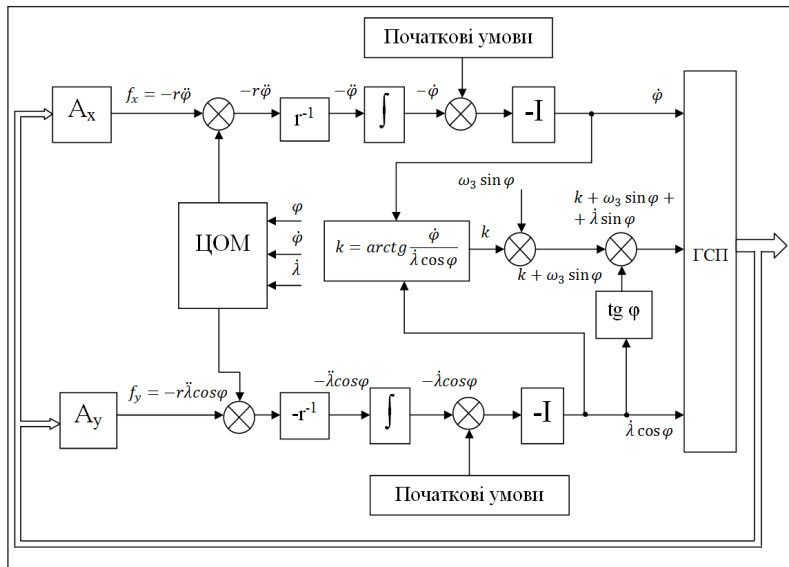


Рис. 2. Блок-схема системи стабілізації [7, с. 52]

$$-2\dot{r}\omega_3 \cos \phi_c - vg, \quad (3)$$

де \aleph, v – кути між нормаллями до еліпсоїда і геоїда відповідно в меридіональному перерізі та в площині перерізу, перпендикулярного площині меридіана; ϕ, ϕ_c – географічна та геоцентрична широта відповідно; χ – відхилення від вертикалі; λ – довгота; g – прискорення; r – радіус місцезнаходження; v – швидкість рухомого об'єкта.

Отримані сигнали надходять до бортового комп'ютера, де формується керуючий сигнал, що надходить до двигунів, які, у свою чергу, вирівнюють ГСП у нульове положення.

Якщо ГСП виставлена абсолютно точно в положення вертикалі, то горизонтальні компоненти прискорення сили тяжіння дорівнюють нулю. Вважаючи, що $\aleph g = -vg = 0$, запишемо складники, які буде компенсувати БЦОМ:

$$f_x \Rightarrow 0 = 2r\omega_3 \dot{\lambda} \cos \phi_c \sin \phi - r\dot{\lambda} \cos \phi_c \sin \phi; \quad (4)$$

$$f_y \Rightarrow 0 = 2r\dot{\phi}_3 \omega_3 \sin \phi_c + 2r\phi_c \dot{\lambda} \sin \phi_c - 2\dot{r}\dot{\lambda} \cos \phi_c - 2\dot{r}\omega_3 \cos \phi_c. \quad (5)$$

Якщо знехтувати складниками другого порядку та прийняти відхилення від вертикалі рівним нулю, то:

$$f_x = -r\ddot{\phi}_c; \quad (6)$$

$$f_y = -2r\dot{\lambda} \dot{\lambda} \cos \phi_c. \quad (7)$$

Якщо кожний із сигналів f_y, f_x помножити на r^{-1} , проінтегрувати і помножити на (-1) , то на виході відповідних каналів буде $\dot{\phi}$ та $\dot{\lambda} \cos \phi$. Сигнал $\dot{\phi}$ буде використовуватися для керування ГСП щодо осі x , спрямованої на північ, а сигнал $\dot{\lambda} \cos \phi$ – для керування щодо осі y , спрямованої на схід.

У роботах [8, с. 956; 9, с. 151; 10, с. 25; 11, с. 166; 12, с. 26;] описано нові високоточні як

п'єзоелектричні, так і ємнісні, струнні, гіроскопічні чутливі елементи, які можуть бути використані в складі системи стабілізації. Всі вони мають як свої переваги, так і недоліки. Описано навіть використання методу двоканальності для скасування впливу інструментальних похибок на точність перетворюючого пристрою.

Сьогодні перспективними є дослідження підвищення точності саме п'єзоелектричних чутливих елементів. Авторами статті в патенті [5, с. 1] описано новий прецизійний п'єзоелектричний чутливий елемент, який має вищу точність від відомих аналогів.

Підвищення точності вимірювання нового прецизійного чутливого елемента системи стабілізації забезпечується завдяки тому, що по кожній осі вимірювання O_z, O_x і O_y встановлено на ГСП чутливий елемент A_z, A_x, A_y , виконаний із двома каналами, в кожному з яких встановлено по одному п'єзоелементу, що є ідентичними. Інерційні маси прикріплені до низу п'єзопластин п'єзоелементів одного каналу та до верху п'єзопластин п'єзоелементів другого каналу. П'єзоелемент першого каналу кожного чутливого елемента працює на основі деформації розтягу, а п'єзоелемент другого каналу – на основі деформації стиснення (рис. 3).

Вихідні електричні сигнали п'єзопластин обох каналів усіх чутливих елементів надходять на входи операційних підсилювачів, що, окрім підсилення, виконують і функцію сумування сигналів, які надходять на входи бортового комп'ютера (далі – БЦОМ).

У бортовому комп'ютері відбуваються необхідні розрахунки, результатом яких є відсилання керуючого сигналу на двигуни ГСП. Також на виході БЦОМ буде і значення повного вектора та повного модуля прискорення, в якому відсутній вплив інструментальних похибок від впливу залишкової неідентичності конструкції однакових п'єзопластин і мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища.

У бортовому комп'ютері відбуваються необхідні розрахунки, результатом яких є відсилання керуючого сигналу на двигуни ГСП. Також на виході БЦОМ буде і значення повного вектора та повного модуля прискорення, в якому відсутній вплив інструментальних похибок від впливу залишкової неідентичності конструкції однакових п'єзопластин і мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища.

Висновки. Визначено що являє собою система стабілізації й описано її конструктивні елементи. Розглянуто класичну систему непрямої стабілізації та систему стабілізації авіаційних гравіметричних систем, здійснено їх математичний опис. Проаналізовано наявні сьогодні види чутливих елементів систем стабілізації. Описано будову та принцип роботи нового прецизійного чутливого елемента для системи стабілізації, що має вищу, ніж відомі аналоги, точність.

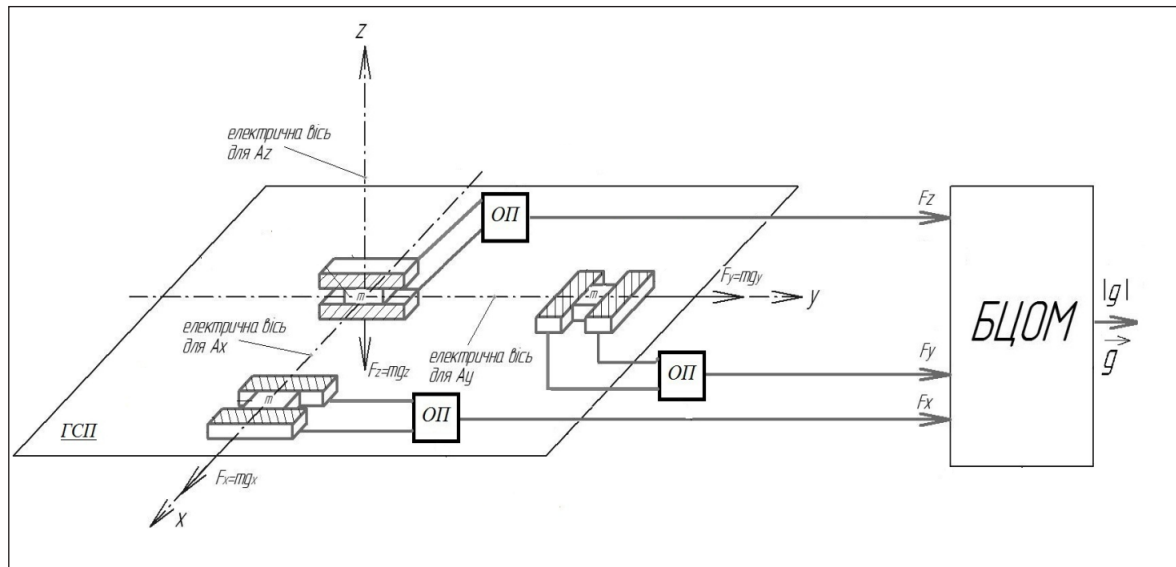


Рис. 3. Прецизійний п'єзоелектричний чутливий елемент

Список літератури:

1. Безвесільна О., Цірук В., Маляров С. Попередня прецизійна виставка навігаційних чутливих елементів приладового комплексу стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки: монографія. Житомир: ЖДТУ, 2016, 235 с.
2. Кузнецов Б., Василець Т., Варфоломійєв О. Система наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин із нейромережєвим регулятором. Системи озброєння і військова техніка. 2010. № 1(13). С. 112–116.
3. Chikovani V. Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of Coriolis vibratory gyroscope resonator. Електроніка та системи управління. 2012. № 4 (34). С. 56–63.
4. Guerard J. Quartz structures for Coriolis Vibrating Gyroscopes. Phys. & Instrum. Dept. 2014. P. 1–4.
5. Безвесільна О., Ткачук А., Гуменюк А., Нечай С. Розрахунок та аналіз статичних похибок двогіроскопного чутливого елемента. Технологічний аудит та резерви виробництва: міжнародний науковий журнал. 2016. № 6/2 (32). С. 9–17.
6. Бесекерский В., Фабрикант Е. Динамический синтез системы гироскопической стабилизации. Ленинград: Судостроение, 1968, 348 с.
7. Безвесільна О. Вимірювання прискорень: підручник. Київ: Либідь, 2001, 264 с.
8. Korobiichuk I., Nowicki M., Bezvesilna O., Tkachuk A. Stabilization system of aviation gravimeter. International Journal of Scientific & Engineering Research. 2015. № 6 (8). P. 956–959.
9. Korobiichuk I. Mathematical model of precision sensor for an automatic weapons stabilizer system. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2016. Vol. 89. P. 151–158.
10. Безвесільна О., Ткачук А. П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи: монографія. Житомир: ЖДТУ, 2013, 240 с.
11. Базіло К. Схемотехнічне моделювання п'єзоелектричного перетворювача з додатковими коливальними контурами. Вісник Хмельницького національного університету. 2013. № 6. С. 166–169.
12. Безвесільна О., Ткачук А., Хильченко Т., Пономаренко В. Компенсація інструментальних похибок низькочастотного гравіметра авіаційної гравіметричної системи шляхом використання методу двоканальності. Вісник інженерної академії України. 2015. № 3. С. 26–30.
13. Безвесільна О., Ткачук А., Хильченко Т., Бичук Р. Трикоординатний п'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи. Патент України на винахід 113033, № а201509858; Заявл. 11.04.2016; Опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ НОВОГО ПРЕЦИЗИОННОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ

Проанализирован состав и назначение автоматизированных систем стабилизации. Рассмотрены классическая система непрямо́й стабилизации и система стабилизации авиационных гравиметрических систем. Проанализированы существующие сегодня виды чувствительных элементов систем стабилизации. Описаны устройство и принцип работы нового прецизионного чувствительного элемента для системы стабилизации, более точного, чем известные аналоги.

Ключевые слова: стабилизатор, пьезоэлемент, чувствительный элемент, погрешность, регулирование.

STRUCTURE AND PRINCIPLE OF OPERATION NEW PRECISION PIEZOELECTRIC SENSING ELEMENTS OF STABILIZATION SYSTEM

The composition and purpose of automated stabilization systems are analyzed. The classical system of indirect stabilization and the system of stabilization of aviation gravimetric systems are considered. The existing types of sensitive elements of stabilization systems are analyzed. The structure and the principle of operation of a new precision sensitive element for a stabilization system with a higher accuracy from the known analogues is described.

Key words: stabilizer, piezoelement, sensitive element, error, regulation.

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.391

Максимюк Т.А.

Національний університет «Львівська політехніка»

Красько О.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

Думич С.С.

Національний університет «Львівська політехніка»

Яремко О.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

Варенко А.М.

Національний університет «Львівська політехніка»

МЕТОД МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У ПАСИВНІЙ ОПТИЧНІЙ МЕРЕЖІ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ФІКСОВАНОГО ТА МОБІЛЬНОГО ДОСТУПУ

У статті запропоновано новий метод мультиплексування інформаційних потоків у пасивних оптичних мережах з інтеграцією фіксованого та мобільного доступу. Запропонований метод використовує технологію спектрального ущільнення каналів із синхронізованими часовими інтервалами для підвищення ефективності розподілу мережних ресурсів. На основі запропонованого методу розроблено модель конвергенції фіксованих та мобільних сегментів доступу, яка дозволяє більш ефективно розподіляти інформаційні потоки між окремими сегментами мережі доступу. Результати моделювання конвергентної мережі доступу показують, що запропонований метод мультиплексування інформаційних потоків дає змогу підвищити ефективність використання каналних ресурсів на 7%. Крім того, новий підхід до розподілу каналних ресурсів в оптичних мережах доступу дозволить більш ефективно планувати пропускну здатність мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління.

Ключові слова: пасивні оптичні мережі, мультиплексування інформаційних потоків, конвергентні мережі доступу, розподіл каналних ресурсів, OWTDMA, 5G.

Постановка проблеми. Розвиток сучасних інформаційних технологій стимулює появу нових мультимедійних послуг, зростання якості контенту, розвиток концепції хмарних обчислень, а також стрімке розширення систем Інтернету речей, які з кожним днем генерують все більше інформаційного трафіку. Тому створення інфраструктури широкосмугового доступу до Інтернету на всій території України віднесено до основних пріоритетів державної стратегії розвитку інформаційного суспільства. Причому останнім часом

спостерігається тенденція до зростання частки трафіку мобільних користувачів у мережі Інтернет, що зумовлено стрімким розвитком мереж 4G та 5G. Зокрема, мережі мобільного зв'язку 5G очікувано будуть мати в 1 000 разів вищу сумарну пропускну здатність порівняно з наявними мережами 4G, що приведе до суттєвого зростання трафіку в оптичних мережах доступу [1]. Тому багато сучасних досліджень спрямовані на розроблення нових конвергентних архітектур та методів передавання даних для оптичних мереж доступу, які

б дозволили забезпечити необхідну пропускну здатність залежно від поточних вимог користувачького навантаження [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найефективнішим методом підвищення пропускну здатності оптичних мереж доступу є використання технології спектрального ущільнення каналів. Проте в умовах флуктуаційного характеру трафіку сучасних мереж із пакетною комутацією постає проблема низької ефективності використання пропускну здатності каналів [3]. Ця проблема пов'язана з високою мобільністю абонентів мобільного зв'язку і, як наслідок, частими змінами навантаження у фіксованих мережах доступу [4]. Тому сучасні конвергентні оптичні мережі доступу передбачають появу нових методів передавання пакетного трафіку в оптичних транспортних мережах, які б враховували динаміку зміни вимог до пропускну здатності каналів та часові статистичні залежності інтенсивності навантаження в мобільному та фіксованому сегментах доступу [5].

У пасивних оптичних мережах зі спектральним ущільненням каналів OLT (Optical Line Terminal) розподіляє каналні інтервали незалежно для кожної довжини хвилі, що часто призводить до неефективного використання пропускну здатності [6]. Після проходження IP-пакетів до термінального вузла OLT виникає необхідність швидкого їх розділення між вузлами призначення. Однією з наявних проблем, яка виникає в термінальному вузлі мережі, є затримка під час перетворення агрегованого трафіку в абонентський трафік [7]. Така затримка зумовлена тим, що вхідні пакети надходять на вхід послідовно. Термінальний вузол обробляє заголовок кожного пакету, аналізує його адресу призначення та пріоритет [8; 9]. За послідовного розподілу пакетів виникає затримка, зумовлена часом очікування окремих пакетів у буфері. Зменшення часу затримки можна досягти двома шляхами: підвищенням швидкості передавання в одному хвильовому каналі або збільшенням кількості хвильових каналів. Перший варіант обмежується нелінійними ефектами та дисперсією. Другий варіант більш ефективний з погляду нарощування пропускну здатності каналу, але спричиняє неефективне використання ресурсів мережі.

Постановка проблеми. Розвиток сучасних інформаційних технологій стимулює появу нових мультимедійних послуг, зростання якості контенту, розвиток концепції хмарних обчислень, а також стрімке розширення систем Інтернету

речей, які з кожним днем генерують все більше інформаційного трафіку. Тому створення інфраструктури широкопasmового доступу до Інтернету на всій території України віднесено до основних пріоритетів державної стратегії розвитку інформаційного суспільства. Причому останнім часом спостерігається тенденція до зростання частки трафіку мобільних користувачів у мережі Інтернет, що зумовлено стрімким розвитком мереж 4G та 5G. Зокрема, мережі мобільного зв'язку 5G очікувано будуть мати в 1 000 разів вищу сумарну пропускну здатність порівняно з наявними мережами 4G, що приведе до суттєвого зростання трафіку в оптичних мережах доступу [1]. Тому багато сучасних досліджень спрямовані на розроблення нових конвергентних архітектур та методів передавання даних для оптичних мереж доступу, які б дозволили забезпечити необхідну пропускну здатність залежно від поточних вимог користувачького навантаження [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найефективнішим методом підвищення пропускну здатності оптичних мереж доступу є використання технології спектрального ущільнення каналів. Проте в умовах флуктуаційного характеру трафіку сучасних мереж із пакетною комутацією постає проблема низької ефективності використання пропускну здатності каналів [3]. Ця проблема пов'язана з високою мобільністю абонентів мобільного зв'язку і, як наслідок, частими змінами навантаження у фіксованих мережах доступу [4]. Тому сучасні конвергентні оптичні мережі доступу передбачають появу нових методів передавання пакетного трафіку в оптичних транспортних мережах, які б враховували динаміку зміни вимог до пропускну здатності каналів та часові статистичні залежності інтенсивності навантаження в мобільному та фіксованому сегментах доступу [5].

У пасивних оптичних мережах зі спектральним ущільненням каналів OLT (Optical Line Terminal) розподіляє каналні інтервали незалежно для кожної довжини хвилі, що часто призводить до неефективного використання пропускну здатності [6]. Після проходження IP-пакетів до термінального вузла OLT виникає необхідність швидкого їх розділення між вузлами призначення. Однією з наявних проблем, яка виникає в термінальному вузлі мережі, є затримка під час перетворення агрегованого трафіку в абонентський трафік [7]. Така затримка зумовлена тим, що вхідні пакети надходять на вхід послідовно. Термінальний вузол обробляє заголовок кожного пакету, аналі-

зує його адресу призначення та пріоритет [8; 9]. За послідовного розподілу пакетів виникає затримка, зумовлена часом очікування окремих пакетів у буфері. Зменшення часу затримки можна досягти двома шляхами: підвищенням швидкості передавання в одному хвильовому каналі або збільшенням кількості хвильових каналів. Перший варіант обмежується нелінійними ефектами та дисперсією. Другий варіант більш ефективний з погляду нарощування пропускної здатності каналу, але спричиняє неефективне використання ресурсів мережі.

Постановка завдання. Мета статті – розробити новий метод мультиплексування інформаційних потоків у пасивних оптичних мережах з інтеграцією фіксованого та мобільного доступу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Метод спектрально-часового мультиплексування інформаційних потоків у пасивних оптичних мережах. Для підвищення ефективності використання пропускної здатності в пасивних оптичних мережах доступу зі спектральним ущільненням каналів запропоновано вдосконалений метод розподілу каналних ресурсів. На відміну від вищерозглянутих моделей, запропонований метод розподілу полягає у формуванні спектрально-часових ресурсних блоків для обох напрямків передавання (рис. 1).

Розмір ресурсного блоку дорівнює $n \times m$, де n відповідає кількості часових інтервалів, а m – кількості довжин хвиль, що використовуються. Кожен ресурсний елемент має часовий інтервал у 15 мкс і частотну смугу у 200 ГГц. Максимальна кількість корисного навантаження, яке може передаватися одним ресурсним елементом – $S_{RE} = 19\,440$ байтів, що відповідає бітовій швидкості передавання даних у 9,95 328 Гбіт/с. Отже, сумарна тривалість ресурсного блока становить 120 мкс, що забезпечує його зворотну сумісність зі стандартним розміром часового кадру пасивної оптичної мережі $T_{GPON} = 125$ мкс [10].

Розподіл пропускної здатності між користувачами здійснюється шляхом виділення ресурсних елементів для кожного вузла ONU. Кожен вузол ONU отримує інформацію про виділені для нього ресурсні елементи службовими каналами, розташування яких у ресурсному блоці є фіксованим.

Запропонована ресурсна сітка представляється в матричній формі так:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & \dots & S_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{m1} & \dots & S_{mn} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де S_{ij} – кількість байт, які можна передати одним ресурсним елементом (19 440 байтів у стандарті GPON).

Для розподілу ресурсів вузла OLT між вузлами ONU кожному ONU присвоюється бінарна матриця розподілу, яка визначає, які саме ресурсні елементи будуть використовуватися для обслуговування даного вузла. Бінарний елемент матриці b_{ij} визначає асоціацію ресурсного елемента i -ї довжини хвилі та j – часового інтервалу з необхідним вузлом ONU:

$$b_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{якщо елемент не використовується для ONU} \\ 1, & \text{якщо елемент використовується для ONU} \end{cases}. \quad (2)$$

Матриця розподілу записується так:

$$\mathbf{B}_{\Psi \cup} = \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & \dots & b_{mn} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Кожному вузлу ONU присвоюється унікальна матриця розподілу, причому окремі елементи даних матриць можуть збігатися між собою. Це забезпечує гнучкість у керуванні пропускною здатністю каналу та покращує масштабованість мережі доступу завдяки одночасному розподілу всіх каналних ресурсів оптичної мережі й усуненню необхідності багатократного передавання однакових блоків даних до різних вузлів ONU.

Інформаційний потік між вузлом OLT та кількома вузлами ONU розраховується так:

$$\mathbf{S}_{ONU} = \mathbf{S} \circ \mathbf{B}_{ONU} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij} b_{ij}, \quad \forall i, j. \quad (4)$$

Запропонований метод не ускладнює фізичний процес передавання даних, оскільки характеристики такої системи на фізичному рівні аналогічні характеристикам звичайних систем зі спектральним ущільненням каналів.

Отже, пропускна здатність каналу зв'язку між OLT та ONU буде розраховуватися так:

$$C_{ONU} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij} \circ b_{ij}}{T_{GPON}}, [\text{Гбіт/с}]. \quad (5)$$

Мінімальна межа пропускної здатності, яка може бути виділена для одного вузла ONU, становить:

$$C_{ONU \min} = \frac{8S_{RE}}{T_{GPON}}, [\text{Гбіт/с}], \quad (6)$$

де S_{RE} – інформаційна ємність одного ресурсного елемента, T_{GPON} – тривалість часового кадру пасивної оптичної мережі.

Максимальна межа пропускної здатності одного ресурсного блока становить:

$$C_{RB} = \frac{8S_{RE} \cdot n \cdot m}{T_{GPON}}, [\text{Гбіт/с}]. \quad (7)$$

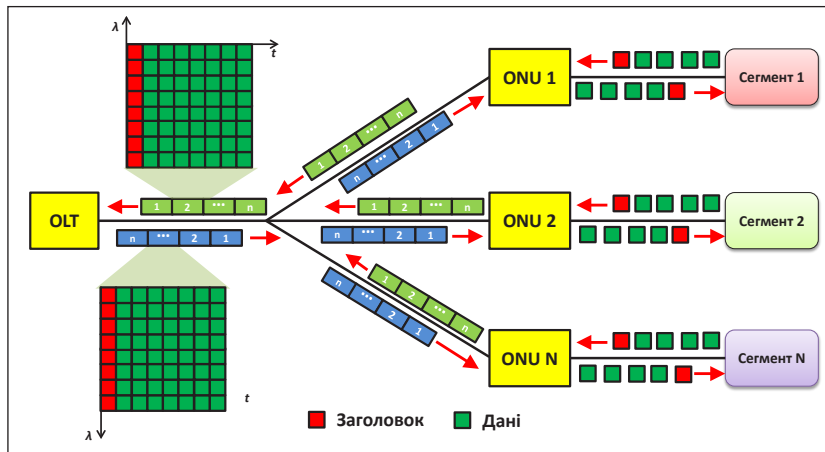


Рис. 1. Принцип спектрально-часового методу розподілу каналних ресурсів між вузлами у висхідному та низхідному напрямках передавання інформаційних потоків

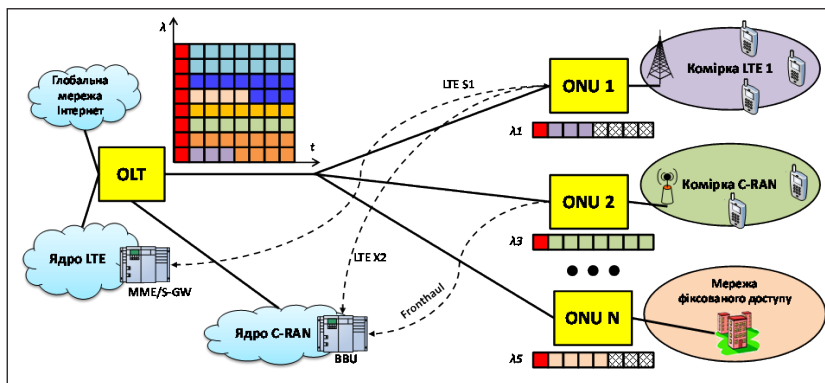


Рис. 2. Принцип мультиплексування інформаційних потоків у запропонованій моделі конвергенції оптичної мережі доступу

Під час розподілу корисної та службової інформації відповідно до поточних стандартів мінімальна та максимальна пропускна здатність становить:

$$C_{ONU \min} = \frac{19440 \cdot 8}{125 \cdot 10^{-6}} = 1.24416 \text{ Гбіт/с}; \quad (8)$$

$$C_{RB} = \frac{19440 \cdot 8 \cdot 8 \cdot 8}{125 \cdot 10^{-6}} = 79.62624 \text{ Гбіт/с}. \quad (9)$$

Запропонована архітектура IPoDWDM для транспортного рівня мережі дозволяє знизити вимоги до рівня агрегації з погляду сумісності форматів представлення інформаційних потоків. Під час використання IPoDWDM на транспортному рівні зникає необхідність виведення окремих каналів із транспортних модулів STM-n на рівні доступу, або потреба у виділенні окремих довжин хвиль. Це, з одного боку, знижує вимоги до синхронізації, а з іншого – підвищує коефіцієнт використання пропускної здатності системи завдяки введенню комбінованого методу спектрально-часового мультиплексування.

Модель конвергенції фіксованих та мобільних сегментів мережі доступу. На відміну від

мереж GSM, у сучасних мережах LTE та перспективних мережах 5G основна частка трафіку припадає на передавання пакетних даних, що призводить до значного розкиду значень пропускної здатності абонентів. У роботі пропонується нова модель конвергенції опорної транспортної мережі гетерогенних мереж мобільного зв'язку з наявною пасивною оптичною мережею. Запропонована модель враховує нестационарність трафіку в комірках мережі мобільного зв'язку та його періодичні статистичні характеристики, що дає змогу підвищити ефективність розподілу пропускної здатності. Враховуючи 15 різних значень спектральної ефективності радіоканалів LTE, сумарний обсяг трафіку в комірці може змінюватися в значному діапазоні залежно від поточного розташування абонентів. Крім того, частка службової інформації в радіоінтерфейсі LTE зростає пропорційно кількості абонентів. Якщо взяти до уваги те, що в LTE абонент може використовувати всю доступну пропускну здатність комірки, то очевидно, що необхідна пропускна здатність опорної мережі обернено пропорційно залежить від кількості абонентів у комірці. Додатковим чинником, який враховується в запропонованій моделі, є процес хендоверу, який генерує до 10% від загального обсягу трафіку в опорній транспортній системі. Крім того, модель також враховує додатковий службовий трафік для тунелювання пакетів на транспортному рівні зі збереженням IP-адреси абонента, частка якого становить приблизно 15% [11].

Для спрощення моделі приймемо, що частотні ресурси комірки рівномірно розподілені між усіма активними абонентами. У такому разі сумарна пропускна здатність комірки розраховується так [12]:

$$C_{ком} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \cdot W \cdot Seff_i, \quad (10)$$

де N – кількість абонентів у комірці, W – сумарна частотна смуга, доступна для комірки, $Seff_i$ – спектральна ефективність i -го абонента. Для спрощення приймемо, що пропускна здатність комірки в низхідному та висхідному каналах є однаковою. Тоді мінімальне необхідне значення пропускної здатності для опорної мережі комірки

в низхідному каналі розраховується відповідно до виразів (8)–(10) так:

$$C_{on\ DL} = \left[\frac{k_{X2} \cdot k_t \cdot C_{KOM}}{C_{ONU\ min}} \right] \cdot C_{ONU\ min} \quad (11)$$

де k_{X2} – коефіцієнт даних хендверу, який становить від 1,05 до 1,2 залежно від мобільності

абонентів, k_t – коефіцієнт надлишковості тунелювання пакетів на транспортному рівні, який становить 1,1. Аналогічно, для висхідного каналу пропускна здатність опорної транспортної мережі становить:

$$C_{on\ UL} = \left[\frac{k_{X2} \cdot C_{KOM}}{C_{ONU\ min}} \right] \cdot C_{ONU\ min} \quad (12)$$

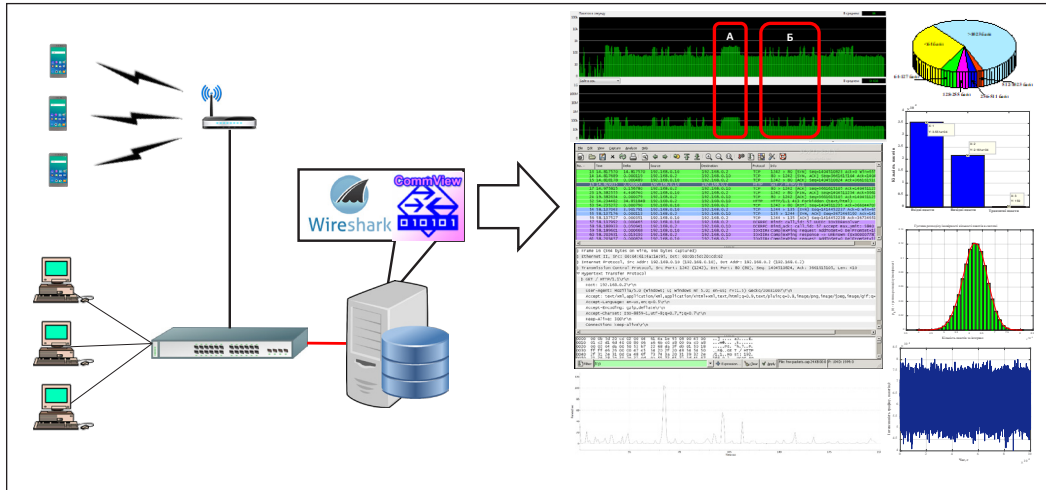


Рис. 3. Структурна схема експериментальної мережі для дослідження статистичних характеристик трафіку

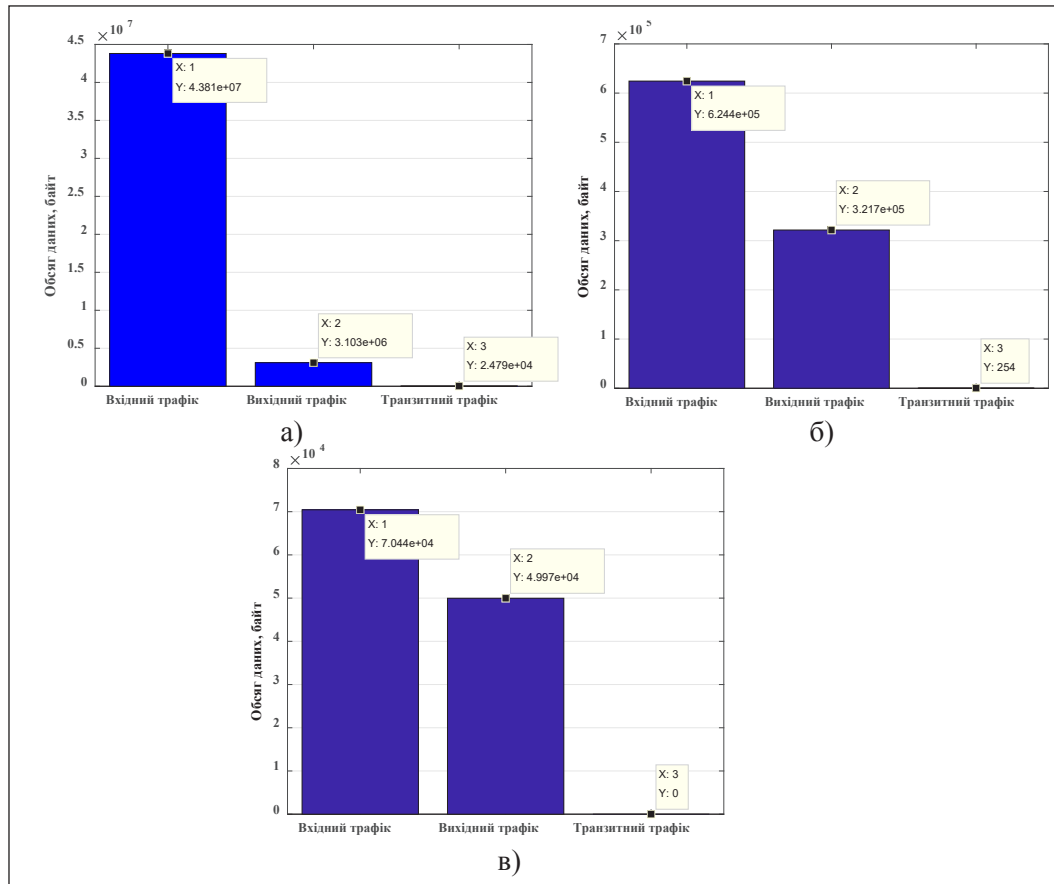


Рис. 4. Співвідношення трафіку за призначенням для веб-сервісів – а), потокового відео – б) та IP-телефонії – в)

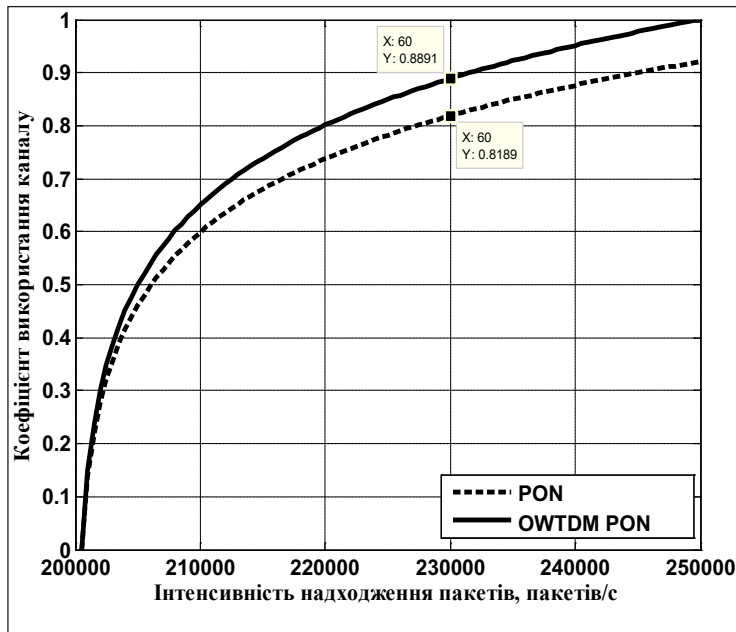


Рис. 5. Порівняльні залежності ефективності використання каналних ресурсів від інтенсивності трафіку за умови використання запропонованого методу

Запропонована модель підтримує тунелювання сигналів від вузлів оброблення (BBU) до віддалених радіомодулів у мережах Cloud-RAN [13]. Транспортування здійснюється поверх оптичної мережі в межах спектрально-часових ресурсних блоків і може співіснувати паралельно із трафіком мереж LTE та фіксованих сегментів доступу. Запропонована модель підтримує підключення мікрокомірок безпосередньо до вузла BBU для централізованого оброблення, використовуючи конвергентну оптичну інфраструктуру. На рис. 2 представлено принцип мультиплексування інформаційних потоків у запропонованій моделі конвергенції опорної транспортної мережі гетерогенних мереж мобільного зв'язку з наявною пасивною оптичною мережею.

Моделювання конвергентної мережі доступу. Для визначення впливу типу сервісів у фіксованих та мобільних мережах на характеристики трафіку необхідно провести дослідження процесу передавання інформаційних потоків за допомогою мережних аналізаторів. Для даної роботи використано програмне забезпечення CommView та Wireshark, що дозволяє перехоплювати інформаційні потоки, які проходять через мережний інтерфейс. Програмне забезпечення CommView застосовувалося для аналізу співвідношення пакетів за розміром, а також

за протоколами мережного, транспортного та прикладного рівнів. Програма Wireshark дозволяє зібрати статистику інтенсивності мережного трафіку та представити її у вигляді графічної залежності. Структурна схема експериментальної мережі для дослідження статистичних характеристик трафіку представлена на рис. 3.

Розроблена тестова модель мережі дозволяє фільтрувати трафік за такими критеріями: протоколи прикладного, транспортного та мережного рівнів, номери портів, призначення пакетів тощо. Для дослідження впливу різних сервісів отримано статистичні залежності трафіку під час використання трьох основних типів послуг, які переважають у мережах мобільного зв'язку четвертого покоління: веб-сервіси, потокове відео та IP-телефонія, частки яких становлять 30%, 55% та 15% відповідно. Гістограми розподілу пакетів для різних типів сервісів представлено на рис. 4.

Для порівняння ефективності запропонованого методу OWTDM (Orthogonal Wavelength-Time Division Multiplexing) з наявними було проведено порівняння коефіцієнта використання каналів за варіації інтенсивності навантаження (рис. 5). За рахунок спектрально-часового мультиплексування покращується гнучкість використання ресурсів та усувається явище недовантаження каналу. Перевага запропонованого методу з погляду коефіцієнта використання каналу становить приблизно 7%.

Висновки. Запропоновано новий метод розподілу каналних ресурсів у пасивній оптичній мережі доступу зі спектральним ущільненням каналів шляхом групування спектрально-часових ресурсних блоків для користувацької та службової інформації. На основі вдосконаленого методу ресурсного розподілу розроблено модель конвергенції фіксованих та мобільних мереж доступу, яка дає змогу підвищити ефективність розподілу каналних ресурсів в оптичній мережі доступу. Результати моделювання показують, що запропоновані рішення дозволяють підвищити ефективність використання пропускної здатності каналів на 7%. Отримані результати дають змогу підвищити ефективність розгортання мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого поколінь на основі спільної опорної транспортної інфраструктури.

Список літератури:

1. Maksymyuk T., Brych M., Strykhalyuk I., Jo M. Fractal modeling for multi-tier heterogeneous networks with ultra-high capacity demands. Smart Computing Review. 2015. Vol. 5. № 4. P. 346–355.

2. Kani J. Enabling technologies for future scalable and flexible WDM-PON and WDM/TDM-PON systems. IEEE Journal of Selected topics in Quantum electronics. 2010. Vol. 16. № 5. P. 1290–1297.
3. Turna O., Aydin M., Atmaca T., Zaim A., Nguyen T. Traffic characterization study on EPON Upstream Channel. International Wireless Communications and Mobile Computing conference (IWCMC 2011): proceedings of international conference (Istanbul, Turkey, July 2011). Istanbul, 2011. P. 1601–1606.
4. Maksymyuk T., Brych M., Masyuk A. Fractal geometry based resource allocation for 5G heterogeneous networks. IEEE Problems of Infocommunications. Science and Technology: proceedings of international conference (Kharkiv, Ukraine, October 2015). Kharkiv, 2015. P. 69–72.
5. Nguyen T., Atmaca T., Eido T. An enhanced QoS-enabled dynamic bandwidth allocation mechanism for ethernet PON. European conference on Universal Multiservice Networks (ECUMN'2009): proceedings of international conference (Sliema, Malta, October 2009). Sliema, 2009.
6. Kanonakis K., Tomkos I. Improving the efficiency of on-line upstream scheduling and wavelength assignment in hybrid WDM/TDMA EPON networks. IEEE Journal on selected areas in communications. 2010. Vol. 28. № 6. P. 838–848.
7. Maksymyuk T., Dumych S., Krasko O., Kaidan M., Strykhalyuk B. Study and development of next-generation optical networks. Smart Computing Review. 2014. Vol. 4. № 6. P. 470–480.
8. Dumych S., Maksymyuk T., Guskov P. Simulation of burst aggregation and signalling schemes for optical burst switched networks. International conference on Computer Science & Engineering 2013: proceedings of international conference (Lviv, Ukraine, November, 2013). Lviv, 2015. P. 40–41.
9. Maksymyuk T., Dumych S., Krasko O., Jo M. Software defined optical switching for cloud computing transport systems. ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (ACM IMCOM 2015): proceedings of international conference (Bali, Indonesia, January 2015). Bali, 2015. Article № 42.
10. McGarry M., Reisslein M., Maier M. Ethernet passive optical network architectures and dynamic bandwidth allocation algorithms. IEEE Communications Surveys Tutorials. 2008. Vol. 10. № 3. P. 46–60.
11. Maksymyuk T., Krasko O., Kyryk M., Romanchuk V., Kolodiy R. Designing the new backhaul for 5G heterogeneous network based on converged optical infrastructure. Acta Electrotechnica et Informatica. 2017. Vol. 17. № 4. P. 9–13.
12. Maksymyuk T., Klymash M., Jo M. Deployment strategies and standardization perspectives for 5G mobile networks. IEEE Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: proceedings of international conference (Lviv, Ukraine, February 2016). Lviv, 2016. P. 953–956.
13. Checko A. Cloud RAN for mobile networks – A technology overview. IEEE Communications Surveys Tutorials. 2015. Vol. 17. № 1. P. 405–426.

МЕТОД МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В ПАССИВНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ИНТЕГРАЦИЕЙ ФИКСИРОВАННОГО И МОБИЛЬНОГО ДОСТУПА

В статье предложен новый метод мультиплексирования информационных потоков в пассивных оптических сетях с интеграцией фиксированной и мобильного доступа. Предложенный метод использует технологию спектрального уплотнения каналов с синхронизированными временными интервалами для повышения эффективности распределения сетевых ресурсов. На основе предложенного метода разработана модель конвергенции фиксированных и мобильных сегментов доступа, позволяющая более эффективно распределять информационные потоки между отдельными сегментами сети доступа. Результаты моделирования конвергентной сети доступа показывают, что предложенный метод мультиплексирования информационных потоков позволяет повысить эффективность использования канальных ресурсов на 7%. Кроме того, новый подход к распределению канальных ресурсов в оптических сетях доступа позволит более эффективно планировать пропускную способность сетей мобильной связи четвертого и пятого поколений.

Ключевые слова: пассивные оптические сети, мультиплексирование информационных потоков, конвергентные сети доступа, распределение канальных ресурсов, OWTDMA, 5G.

METHOD OF DATA FLOWS MULTIPLEXING IN PASSIVE OPTICAL NETWORK WITH INTEGRATED FIXED AND MOBILE ACCESS SEGMENTS

This paper presents a new method of data flows multiplexing in passive optical network, which integrates both fixed and mobile access segments. Proposed method uses the wavelength division multiplexing technology with synchronized time slots to improve the efficiency of resource allocation. Based on the proposed method, the convergence model is developed to combine fixed and mobile access networks with unified resource grid. Proposed model allows to improve the data flows management among different network segments. Simulation results show that that proposed wavelength-time multiplexing provide 7% improvement in channel utilization. Moreover, the proposed approach for resource allocation in optical access networks allows to improve the efficiency of capacity planning in 4G and 5G mobile networks.

Key words: passive optical networks, data flows multiplexing, resource allocation, converged access networks, OWTDMA, 5G.

УДК 621.373.52:539.1.078

Саміла А.П.

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

Розорінов Г.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Гресь О.В.

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

РОЗРОБЛЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ МЕТОДІВ РАДІОСПЕКТРОСКОПІЇ ЯДЕРНОГО КВАДРУПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСУ НА ОСНОВІ ПРОГРАМОВАНОЇ ЛОГІЧНОЇ ІНТЕГРАЛЬНОЇ СХЕМИ

Запропоновано формувач імпульсних послідовностей для проведення досліджень із застосуванням радіоспектроскопічних та релаксаційних методик в ядерному квадрупольному резонансі. Відмінною особливістю розроблення є його реалізація із застосуванням багатофункціонального програмно керованого синтезатора частоти з можливістю швидкісної амплітудної та фазової маніпуляцій.

Ключові слова: ЯКР, імпульсна послідовність, програмована логічна інтегральна схема, синтезатор частоти.

Постановка проблеми. Застосування методів релаксаційної спектроскопії є інструментом для вивчення структури, дефектності та динамічних характеристик кристалічної ґратки напівпровідникових структур шляхом ядерного квадрупольного резонансу (далі – ЯКР) [1; 2].

Імпульсні методи спостереження ЯКР широко застосовуються для вирішення різних завдань фізики твердого тіла і мають низку важливих переваг порівняно зі стаціонарними методами радіоспектроскопії. Зокрема, це можливість швидкого і точного вимірювання часів релаксації. У разі використання імпульсного методу дослідження спектральних характеристик ЯКР можливе отримання додаткової інформації за результатами вимірювань часу поперечної та спін-ґраткової релаксацій, що є результатом взаємодії всередині спінової системи та з іншими ступенями свободи в решітці. Дані параметри якісно характеризують динаміку решітки та спінів.

Важливим функціональним елементом імпульсного Фур'є-спектрометра ЯКР є формувач багатоімпульсних послідовностей, що задає програму формування імпульсів збудження ЯКР відповідно до наперед заданого алгоритму. Програматор повинен формувати імпульсні послідовності з наперед заданою точністю та забезпечувати функ-

ції регулювання часових параметрів імпульсів і пауз між ними, а також початкових фаз. Якщо з допомогою даного пристрою формувати серію імпульсів збудження і послідовно повертати систему ядерних спінів, то отримуємо низку сигналів, які поступово затухають і через декілька десятків імпульсів можуть не спостерігатися. Це зумовлено некогерентністю обертання спінів або втратою «фазової пам'яті» унаслідок різних взаємодій мікросистеми [3].

Більшість пристроїв формування імпульсів збудження для проведення ядерних резонансних і релаксаційних досліджень в області ЯКР – ЯМР виконані у вигляді плат розширення персонального комп'ютера і потребують розроблення спеціалізованого програмного забезпечення, що накладає обмеження на їхню мобільність [4]. Крім того, через багатофункціональність і, як наслідок, високу ціну, використання таких пристроїв є економічно необґрунтованим для багатьох наукових лабораторій.

У роботі представлено реалізацію конфігураційної структури програмованої логічної інтегральної схеми (далі – ПЛІС) EP4CE15E22C8, яка уможливує реалізацію функціонального програмно керованого формувача імпульсних послідовностей для впровадження багатоімпульсних

методів ЯКР. Використання ПЛІС забезпечило формування імпульсів збудження ЯКР із наперед заданою високою точністю та можливістю зміни конфігурації параметрів послідовностей не тільки на етапі розроблення, але й під час проведення радіофізичних експериментів з ЯКР.

Обґрунтування вибору методики. Наявні на даний час апаратні методи імпульсної Фур'є-спектроскопії та релаксометрії ЯКР умовно розділяють на когерентні та некогерентні системи, що відрізняються наявністю синхронізації фази імпульсів збудження з коливаннями несучої частоти (рис. 1). Створені пакети коливань несучої частоти (рис. 1, г) слугують імпульсами зондування, передні фронти яких формуються імпульсами запуску (рис. 1, б) і синхронізовані за фазою з коливанням несучої частоти (рис. 1, а), що забезпечує цілковиту когерентність роботи імпульсного спектрометра.

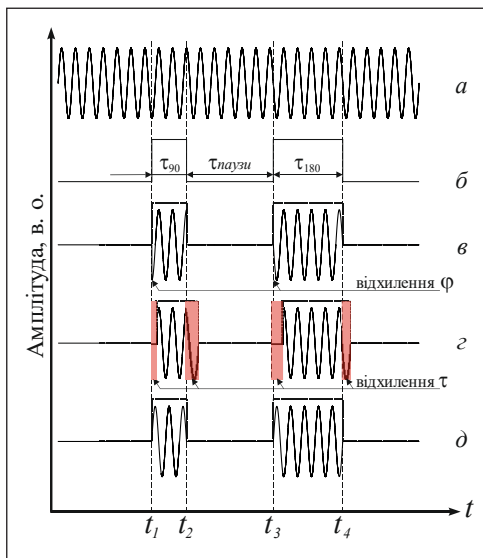


Рис. 1. Часові діаграми формування імпульсів збудження ЯКР: коливання несучої частоти й огинаюча імпульсу збудження (а, б); імпульси зондування за некогерентного, когерентного формування і застосування керованого синтезатора (в, г, д)

У проведенні релаксаційних досліджень важливі як когерентність сформованих імпульсів, так і точність встановлення часових параметрів 90°-го, 180°-го імпульсів і пауз між ними.

Оскільки частота сигналу ЯКР для певної сполуки залежить від величини градієнта електричного поля, то часто значення частоти резонансу невідоме до проведення експерименту. Тому постає необхідність зміни частоти заповнення та тривалості 90°-го і 180°-го імпульсів у кожному конкретному випадку. У разі використання методики, наведеної в [5], розв'язання цієї задачі про-

блематичне, оскільки внаслідок фазової прив'язки імпульсів зондування до несучого коливання виникає часова похибка, що накопичується зі збільшенням кількості імпульсів у послідовності (рис. 1, г).

Широкий спектр методик спостереження ЯКР потребує застосування формувачів із можливістю встановлення та зміни багатьох параметрів імпульсів у послідовностях, що підвищує складність реалізації, а отже, вартість апаратури для спостереження ЯКР. Поява реконфігурованих програмованих логікових інтегральних схем спрощує дану задачу й уможливорює реалізацію імпульсних методів ЯКР на їх основі, оскільки використання ПЛІС дозволяє створити не тільки носійні коливання зі строго заданою частотою і початковою фазою, але і гнучку систему формування когерентних імпульсів збудження сигналів ЯКР.

Розроблення алгоритму для ПЛІС. Для розроблення формувача імпульсних послідовностей на основі синтезатора частот із програмним керуванням запропоновано схему конфігураційної структури ПЛІС (рис. 2). Запропонований формувач імпульсних послідовностей для імпульсного спектрометра ЯКР являє собою програмно-апаратне розроблення. Програмний алгоритм розроблено засобами моделювання і розроблення надвеликих інтегральних схем і систем-на-кристалі фірми Intel (Altera) [6].

Відмінною особливістю запропонованого методу формування багатоімпульсних послідовностей є його реалізація на основі багатфункціонального програмно керованого цифрового синтезатора частоти з можливістю швидкісної частотної та фазової маніпуляцій (рис. 3). Крім формування неперервних коливань, що слугують для заповнення імпульсів зондування в діапазоні резонансних частот ЯКР від 2 МГц до 50 МГц (ізотопи ^{14}N , ^{69}Ga , ^{71}Ga , ^{113}In , ^{115}In та інші), запропонований синтезатор частот також є джерелом опорних сигналів синусоїдальної та косинусоїдальної форм для високочастотного квадратурного детектора.

Конфігураційна структура синтезатора (рис. 3), реалізованого за принципом побудови прямих цифрових синтезаторів частот (далі – ПЦСЧ) на основі прямого табличного синтезу, розроблена в програмному середовищі ALTERA Quartus II Web Edition. Основою запропонованого синтезатора є 48-бітний акумулятор фази “altaccumulate 0”, що формує послідовність кодів миттєвої лінійно-змінної фази генерованого сигналу. Значення відліків вихідного сигналу синтезатора частоти, записані в таблицю енергонезалежної пам'яті

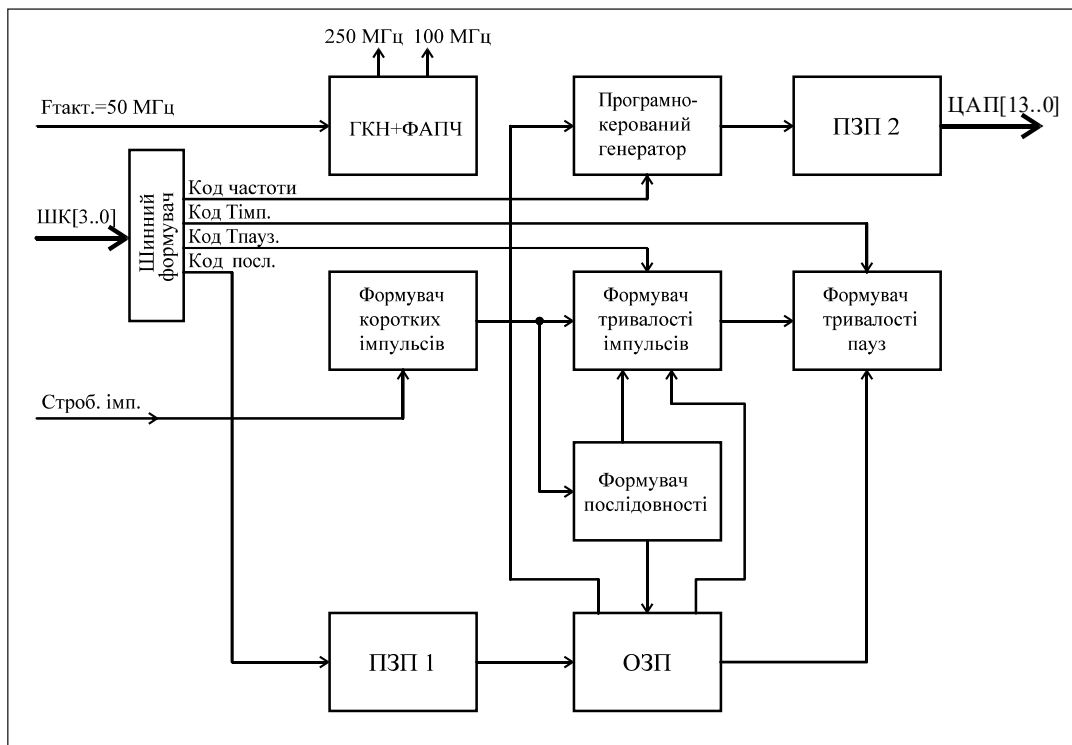


Рис. 2. Структурна схема формування багатоімпульсних послідовностей на основі синтезатора із програмним керуванням

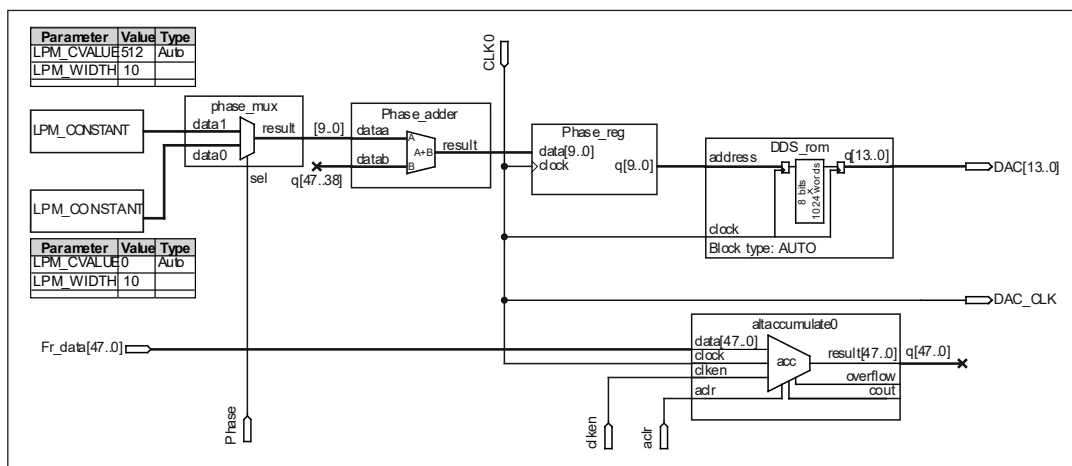


Рис. 3. Конфігураційна структура ПЦСЧ, розроблена в програмному середовищі ALTERA Quartus II Web Edition

ПЛІС “DDS_rom” – ПЗП2. Розрахунок табличних значень одного періоду гармонічного коливання, що змінюється в часі за законом $y = \sin(x)$, здійснено в програмному середовищі Origin Pro v8. Період одного коливання складається із 2 048 14-бітних відліків. Циклічно повторювані значення відліків вихідного сигналу, що записані в таблицю ПЗП2 “DDS_rom”, забезпечують формування сигналу на виході ПЦСЧ у вигляді періодичної функції $y(t) = A \sin(2\lambda t + A)$. Додаткові модулі запропонованої конфігураційної структури ПЦСЧ “phase_mux”, “phase_adder” і “phase_reg” слугують для здійснення

фазової маніпуляції несучої частоти вихідного сигналу.

Схема формування імпульсних послідовностей у програмному редакторі ALTERA Quartus II Web Edition, що відповідає розробленому алгоритму, наведена на рис. 4.

Модуль PLL є програмованою системою ФАПЧ, що забезпечує формування коливань із частотами $f_{макс1} = 250$ МГц та $f_{макс2} = 100$ МГц із використанням зовнішнього тактового генератора, що працює на частоті 50 МГц. Частота $f_{макс1}$ є опорною для цифрового

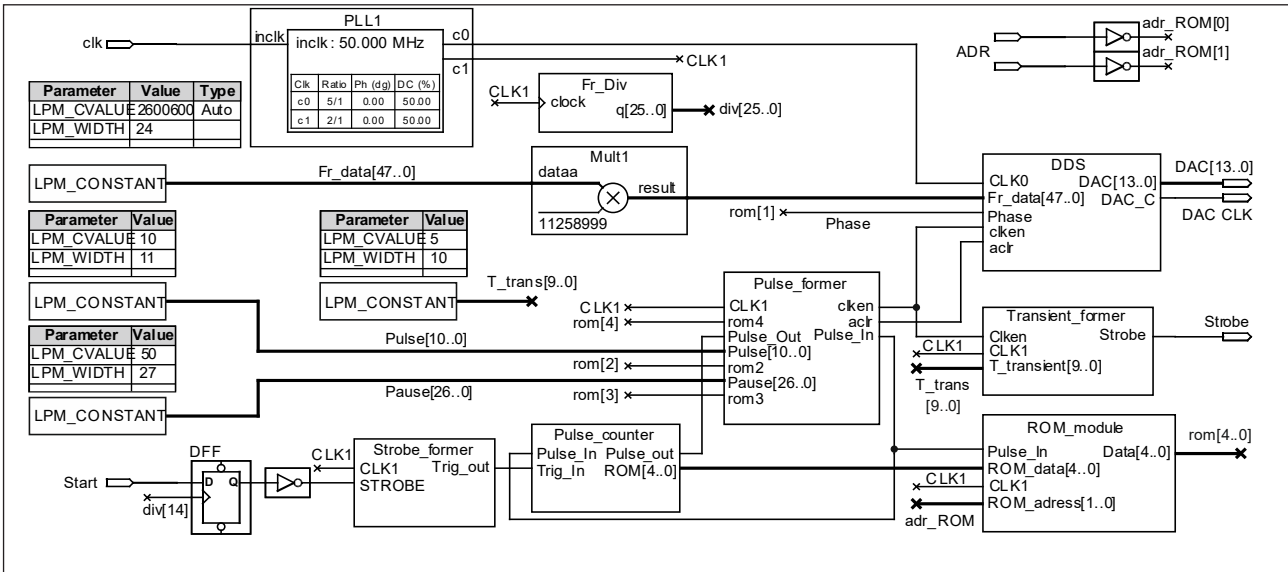


Рис. 4. Конфігураційна структура формувача імпульсних послідовностей, розроблена в програмному середовищі ALTERA Quartus II Web Edition

синтезатора частоти, а $f_{макс2}$ – для роботи схеми формування імпульсів із мінімальною тривалістю $\tau = 100$ нс.

Помножувач “mult 1” забезпечує можливість введення вхідного коду частоти безпосередньо у вигляді числової константи відповідної передбачуваному числовому значенню частоти генерованого сигналу. Він помножує вхідний код частоти K_1 на константу $K_2 = 11\,258\,999$, що задає крок перебудови синтезатора величиною $\Delta f = 10$ Гц.

Залежність частоти сигналу $f_{вих}$ на виході генератора із числовим управлінням від опорної тактової частоти $f_{макс}$, розрядності акумулятора фази M та коду частоти K визначається таким виразом [7]:

$$f_{вих} = \frac{K \times f_{такт}}{2^M}. \quad (1)$$

Крок перебудови частоти не залежить від її значення і дорівнює:

$$\Delta f_{вих} = \frac{f_{такт}}{2^M}. \quad (2)$$

У нашому разі робоча частота акумулятора фази “altaccumulate 0” розрядністю $M = 48$ біт дорівнює $f_{макс1} = 250$ МГц. Отже, крок перебудови частоти становитиме $\Delta f_{вих} \approx 1 \times 10^{-6}$ Гц. Для формування сигналу із частотою $f_{вих}$ на вхід “Fr_data [47..0]” синтезатора необхідно подавати 24-бітний код частоти, що визначається так:

$$K_1 = \frac{2^M}{f_{такт} K_2} = 25 \times 10^6 \frac{f_{вих}}{f_{такт}}. \quad (3)$$

Формування послідовності розпочинається синхронно із вхідним імпульсом стробування на вході “Start”. Дані про частоту носійного коливання, тривалість 90°-го імпульсу, тривалість паузи між імпульсами та тип послідовності

поступають із блоку керування спектрометром за чотирьохрозрядною шиною керування ШК [3..0]. Тривалість 90°-го імпульсу задається в діапазоні 0,1–20 мкс із кроком 0,1 мкс. Проміжок між імпульсами регулюється в діапазоні 0,1 мкс – 1 с. Інші часові довжини, наприклад, у послідовності Карра-Паррселла, довжина 180°-их імпульсів і проміжків між ними встановлюються автоматично, згідно з вибраною програмою, записаною в ПЗПІ. Кількість імпульсів у серії задається в межах 1–30. Дані про параметри тієї чи іншої послідовності через буферну оперативну пам’ять ОЗП поступають на відповідні виконуючі пристрої конфігураційної структури, що зображена на рис. 4 (програмно керований генератор, формувачі тривалості імпульсів та пауз між ними).

Структура фрагмента файлу, записаного в ПЗПІ (рис. 5), відображає розташування інформаційних бітів у словах. Перший біт відповідає за наявність імпульсу в послідовності. Наступні біти надають можливість керування тривалостями імпульсів і пауз, їхніми початковими фазами та стартом активації ПЦСЧ.

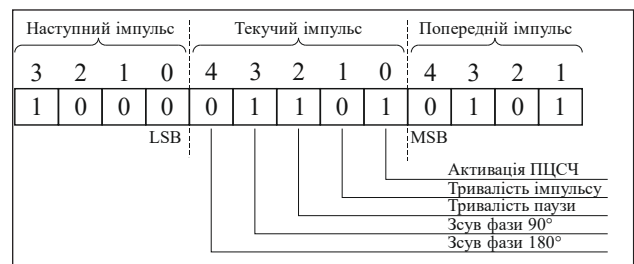


Рис. 5. Структура запису пам’яті ПЗПІ

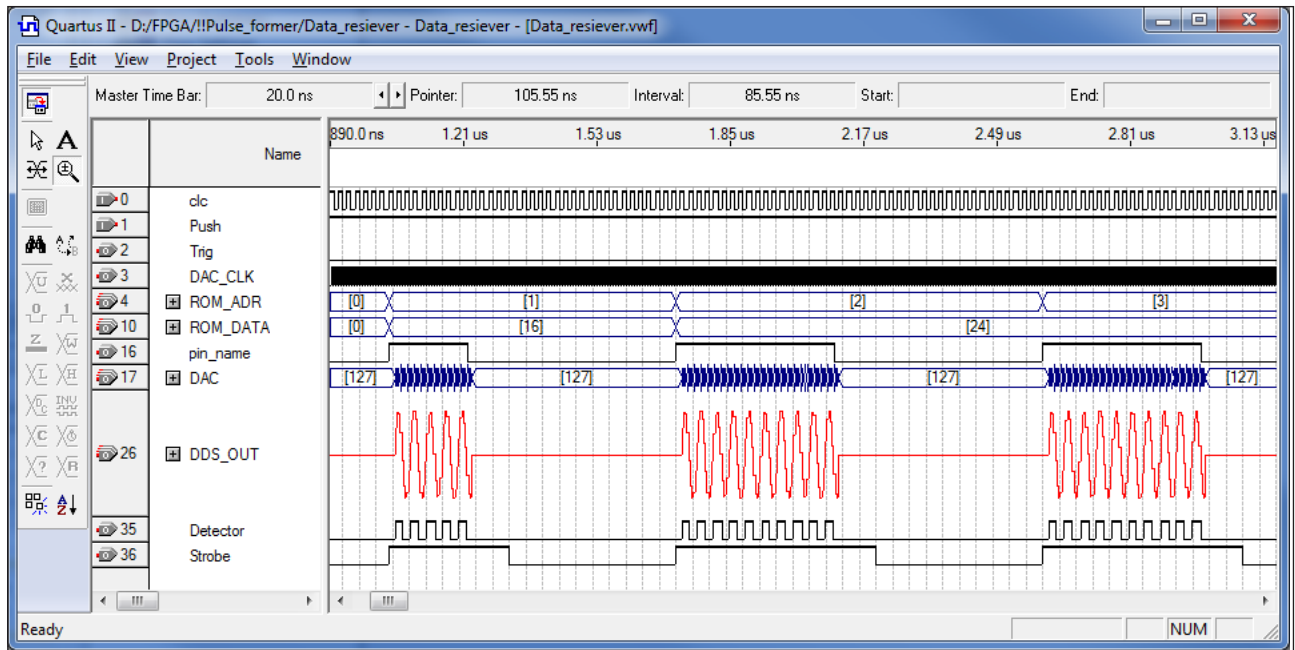


Рис. 6. Симуляція роботи пристрою для повного циклу формування послідовності імпульсів

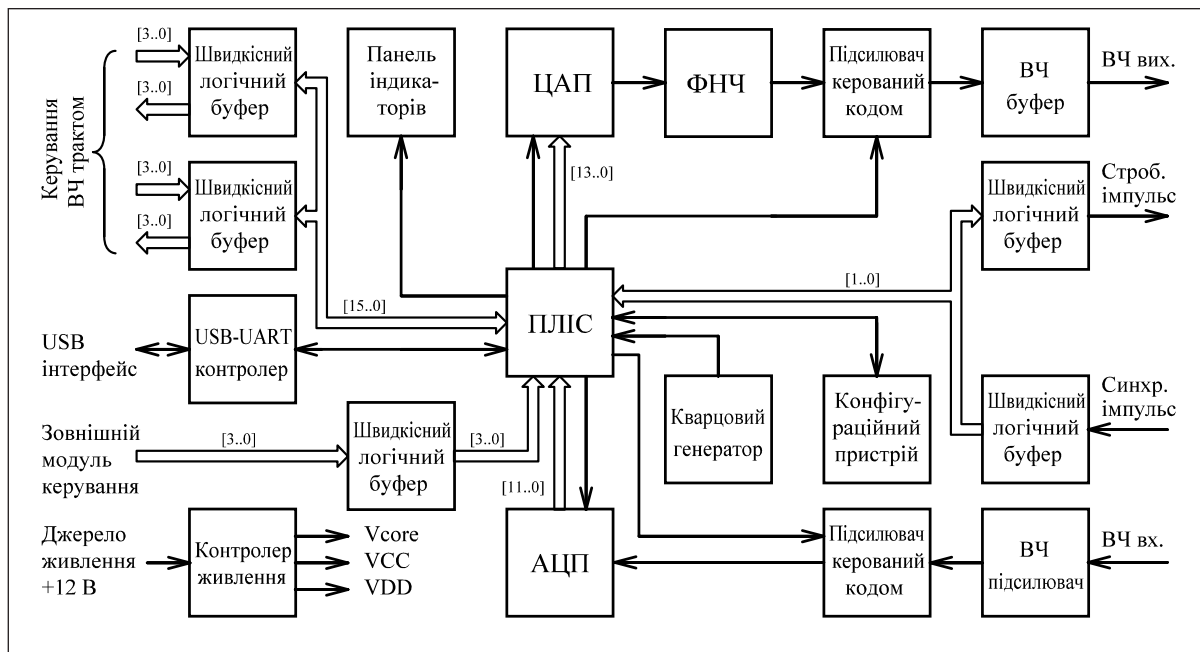


Рис. 7. Структурна схема системної плати спектрометра ЯКР

Розроблений програмний алгоритм та відповідна конфігураційна структура ПЛІС для генерування мультимпульсних послідовностей збудження ЯКР також передбачають формування опорного сигналу для роботи квадратурного детектора цифрового приймального тракту й імпульсів стробування для керування пристроєм комутації вхідного кола радіоспектрометра (рис. 6).

Апаратна реалізація й експеримент. Для апаратної реалізації цифрового обчислювального

ядра імпульсного ЯКР-спектрометра розроблена системна плата, що містить цифро-аналоговий та аналогово-цифровий перетворювачі, фільтр нижніх частот, узгоджувальні та буферні підсилювачі, схеми конфігурації та живлення, а також інші функціональні елементи (рис. 7). Основою запропонованого розроблення є ПЛІС EP4CE15E22C8 сімейства Altera Cyclone IV [8]. Внутрішня структура даної ПЛІС містить понад 15 000 логічних елементів, на базі яких можна реалізувати циф-

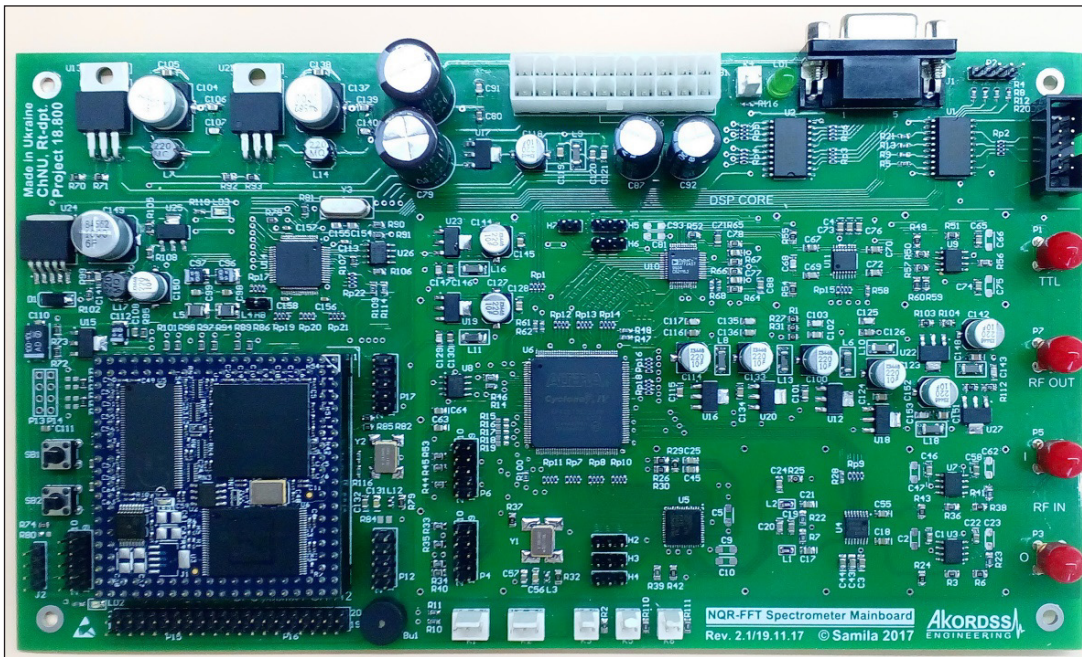


Рис. 8. Системна плата імпульсного спектрометра ЯКР

рові функціональні блоки шляхом синтаксису моделювання динамічних режимів логікових структур. Особливістю застосованої ПЛІС є наявність у ній чотирьох функціонально незалежних модулів ФАПЧ.

Цифро-аналогове перетворення вихідного сигналу ПЦСЧ забезпечується зовнішнім 14-розрядним ЦАП AD9772AASZT, що містить вбудовані цифрові інтерполяційні фільтри. Додаткова фільтрація побічних спектральних складників вищих порядків, зумовлених нелінійністю роботи ЦАП, забезпечується еліптичним аналоговим фільтром нижніх частот 7-го порядку із частотою зрізу приблизно 70 МГц. Регулювання величини амплітуди генерованих коливань здійснюється підсилювачем, керованим кодом AD8369ARU, коефіцієнт підсилення якого задається програмно із ПЛІС. Узгодження вихідного опору пристрою із вхідним опором підсилювача потужності високої частоти здійснюється за допомогою операційного підсилювача AD8055ARZ зі смугою пропускання 300 МГц. Для завантаження програмного алгоритму в конфігураційну пам'ять передбачені інтерфейсні порти JTAG та Active Serial. На передній панелі системної плати спектрометра встановлені коаксіальні роз'єми для підключення передавального та приймального тракту радіоспектрометра, а також органи індикації роботи синтезатора і передавання даних. Обмін даних із комп'ютером через USB-інтерфейс забезпечує апаратний USB-UART-контролер FT2232HL.

Фото лабораторного макета системної плати імпульсного спектрометра зображено на рис. 8. Розроблений пристрій забезпечує формування імпульсних послідовностей і реалізацію функцій оброблення сигналів відгуку ЯКР та повне керування функціональними вузлами Фур'є-спектрометра. Зокрема, передбачено канал аналогово-цифрового перетворення на основі мікросхем 12-розрядного АЦП AD9230BCPZ-170 і узгоджувального операційного підсилювача AD8138 для реалізації цифрового квадратурного детектування та фільтрації сигналів СВІ. Два TTL-сумісні канали синхронізації, розроблені з використанням швидкодіючих логічних буферів 74LVC244, забезпечують передавання сигналів керування на апаратні модулі передавача та приймача імпульсного портативного радіоспектрометра ЯКР. Процесорний модуль на основі Altera NIOS-EVALKIT-1C12 забезпечує керування користувальницькими функціями та режимами роботи системної плати радіоспектрометра за програмним алгоритмом, реалізованим на основі машини кінцевих станів. Алгоритм роботи та принцип реалізації процесорного модуля представлені в роботах [9; 10].

В енергонезалежній пам'яті ПЛІС записано алгоритми формування 30-ти різних типів імпульсних послідовностей, застосування яких забезпечує реалізацію широкого спектра радіоспектроскопічних та релаксаційних методик в ЯКР. Зокрема, для визначення часів релаксації T_1 і T_2

(послідовність типу CPMG), забезпечення накопичення слабких сигналів ЯКР (послідовності SSFP і SLSE) за швидкої та повільної релаксації, усереднення неоднорідного уширення спектральної лінії із застосуванням послідовності чергування фаз імпульсів (PAPS) та нутаційної спектроскопії.

Конфігурація, що завантажується в ПЛІС, може зберігатися як у статичній пам'яті (SRAM), так і в постійному запам'ятовуючому пристрої (EEPROM або Flash). Мікросхема EP4CE15E22C8 відноситься до SRAM-конфігураційних ПЛІС, тому збереження конфігураційної інформації здійснюється шляхом використання зовнішньої мікросхеми ПЗП EPCS16 із послідовним інтерфейсом. У розробленому пристрої передбачено два режими програмування: активний послідовний (Active Serial) та через JTAG-інтерфейс. Вибір режиму конфігурування визначається комбінацією на входах MSEL мікросхеми ПЛІС Altera Cyclone IV.

Розроблений пристрій досліджено як в одно-, так і в багатоімпульсному режимах. Осцилограми напруги на виході пристрою під час формування найбільш поширених в ЯКР послідовностей наведені на рис. 9. Діапазон робочих частот розробленого пристрою – 1–50 МГц, що обмежується частотами ЯКР актуальних ядер ізотопів ^{14}N , ^{35}Cl , ^{63}Cu , ^{69}Ga , ^{71}Ga , ^{113}In , ^{115}In та ін.

Висновки. Розроблена структура та принципова електрична схема системної плати спектрометра, цифрове обчислювальне ядро якої реалізоване на базі ПЛІС EP4CE15E22C8. Застосування двокаскадної фільтрації засобами вбудованих інтерполяційних фільтрів та зовнішнього ФНЧ із частотою зрізу 70 МГц уможливило генерацію сигналів збудження ЯКР із низьким рівнем спектральних складників вищих порядків.

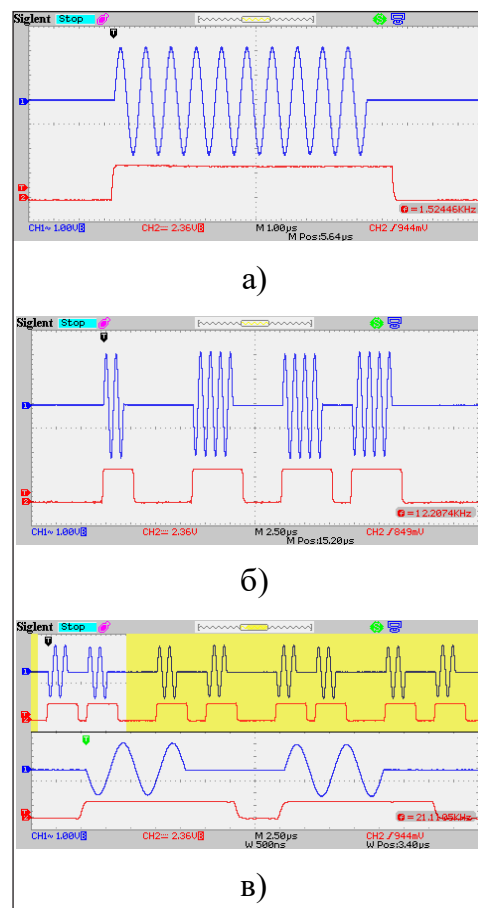


Рис. 9. Осцилограми напруг на виході формувача імпульсних послідовностей: одиничний імпульс (а); послідовність Карра-Пуррелла (б); послідовність MREV-8 (WANUNA) (в)

Результати експериментальних випробувань показали, що пристрій забезпечує формування імпульсних послідовностей, необхідних для проведення релаксаційних досліджень ЯКР у діапазоні частот 1–50 МГц.

Список літератури:

- Саміла А., Хандожко В., Ковалюк З. Ядерний квадрупольний резонанс і сенсорні властивості шаруватих напівпровідникових кристалів GaSe та InSe. Ж. наноелектрон. фіз. 2015. Т. 7. № 3. С. 1–5.
- Саміла А., Ластівка Г., Хандожко В. Вимірювання індукції магнітного поля із застосуванням ефекту Зеемана в ядерному квадрупольному резонансі сполук GaSe та InSe. Ж. нано-електрон. фіз. 2016. Т. 8. № 4. С. 1–4.
- Shen Jie, Ying Liu, Jianqi Li, Gengying Li. A powerful graphical pulse sequence programming tool for magnetic resonance imaging. Magnetic resonance materials in physics, biology and medicine. 2005. Vol. 18. № 6. P. 332–342.
- Radio Processor-G™ Owner's Manual // Spin Core Technologies, Inc. URL: http://www.spincore.com/CD/RadioProcessor-G/RadioProcessor-G_Manual.pdf (дата звернення: 27.09.2015).
- Хандожко А., Хандожко В., Саміла А. Импульсный радиоспектрометр ЯКР с эффективным подавлением переходного процесса. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. № 6/12 (66). С. 21–25.
- Three Quartus® Prime editions to meet your system design requirements // Intel Corporation. URL: <https://www.altera.com/downloads/download-center.html> (дата звернення: 07.12.2016).
- Ридико Л. DDS: прямой цифровой синтез частоты. Компоненты и технологии. 2001. № № 7, 8. С. 50–56.

8. Cyclone IV FPGA Device Family Overview // Altera Corporation. URL: https://www.altera.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/hb/cyclone-iv/cyiv-51001.pdf (дата звернення: 12.10.2016).
9. Samila Andriy, Khandozhko Alexander, Hryhorchak Ivan, Politsans'kyu Leonid, Kazemirskiy Taras. A Control Unit for a Pulsed NQR-FFT Spectrometer. IAPGOS. 2015. Vol. 5 (4). P. 55–58.
10. Саміла А. Застосування статично-конфігурованої ПЛІС у цифровій системі керування радіоспектрометром ЯКР. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2016. № 4 (53). С. 73–82.

РАЗРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫХ МЕТОДОВ РАДИОСПЕКТРОСКОПИИ ЯДЕРНОГО КВАДРУПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСА НА ОСНОВЕ ПРОГРАММИРУЕМОЙ ЛОГИЧНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ

Предложен формирователь импульсных последовательностей для проведения исследований с применением радиоспектроскопических и релаксационных методик в ядерном квадрупольном резонансе. Отличительной особенностью разработки является ее реализация с применением многофункционального программно управляемого синтезатора частот с возможностью скоростной амплитудной и фазовой манипуляций.

Ключевые слова: ЯКР, импульсная последовательность, программируемая логическая интегральная схема, синтезатор частоты.

IMPLEMENTATION OF PULSED NQR RADIOSPECTROSCOPY METHODS ON FPGA

A multi-functional programmer of pulse sequences for NQR Fourier spectrometer has been developed on the basis of FPGA. The experimental test results have shown that the device assures shaping of pulsed sequences necessary for the pursuance of relaxation research in the frequency range of 1–50 MHz. The proposed programmer allows shaping of one, two and multi-pulsed sequences which enables the experiments on measuring relaxation times using the methods of Hahn, Carr-Purcell, Meiboom-Gill, et al. Owing to a wide range of change in pulse lengths and the possibility of shaping various sequences, this programmer assures a change in parameters T_1 , T_2 , T_2 . Digital shaping of pulse sequences implemented in the proposed product assures high stability and accuracy of all temporal relations. The programmer guarantees phase binding of high-frequency filling of video pulses to pulse fronts.

Key words: NQR, pulse sequence, Field – Programmable Gate Array, frequency synthesizer.

Семенов А.О.

Вінницький національний технічний університет

МОДЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ РАДІОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНИХ СТРУКТУР ІЗ ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

У роботі наведено результати теоретичних досліджень та математичного моделювання радіотехнічного пристрою формування сигналів на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Запропоновано нове рівняння апроксимації статичної вольт-амперної характеристики біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Розглянуто просту аналогову схему радіотехнічного пристрою для формування сигналів. Запропоновано математичну модель пристрою. Досліджено динаміку періодичних коливань у режимах підсилення, ділення частоти й амплітудної модуляції вхідного сигналу. Отримано фазові портрети, фігури Ліссажу, часові діаграми та амплітудо-частотні спектри вхідної та вихідної напруги.

Ключові слова: транзисторна структура, від'ємний опір, математична модель, електричні коливання, фазовий портрет.

Постановка проблеми. Для побудови радіотехнічних пристроїв використовуються напівпровідникові прилади з від'ємним диференціальним опором та їх транзисторні схемотехнічні аналоги [1; 2]. Це зумовлено тим, що такі пристрої мають нелінійну вольт-амперну характеристику складної форми [3]. На практиці радіотехнічні пристрої з від'ємним опором мають складну неперіодичну і хаотичну поведінку [4]. Під час подання зовнішнього синусоїдального сигналу в таких пристроях виникає складна динаміка коливань, спостерігаються біфуркації, що зумовлюють подвоєння та потроєння періодів коливань [4; 5]. Тому дослідження динаміки електричних коливань у радіотехнічних пристроях із від'ємним опором є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На практиці для побудови радіотехнічних пристроїв формування аналогових сигналів застосовують транзисторні структури з вольт-амперними характеристиками (далі – ВАХ) Λ -, N- або S-типу [1–3], на основі диференціальних каскадів [6, с. 390], або каскадних схем [7]. Динаміка електричних коливань і режими роботи таких радіотехнічних пристроїв не залежать від типу транзисторів. Динаміка коливань і режими роботи цих пристроїв визначаються нелінійними властивостями статичних ВАХ і динамічними властивостями коливальної системи [4; 5]. Більшість результатів досліджень радіотехнічних пристроїв

на основі транзисторних структур із від'ємним опором отримані для випадку періодичної динаміки електричних коливань осциляторного або релаксаційного типів [1–3; 7]. Нелінійним і хаотичним режимам роботи таких пристроїв приділено менше уваги [4–6]. Тому розвиток теорії нелінійних властивостей і режимів роботи радіотехнічних пристроїв на основі транзисторних структур із від'ємним опором із різними геометричними формами статичних ВАХ є невирішеною задачею.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження нелінійної динаміки електричних коливань у неавтономному радіотехнічному пристрої формування сигналів на основі транзисторної структури з від'ємним опором, що має ВАХ Λ -типу з вигином догори. Такі форми статичних ВАХ характерні для окремих біполярних транзисторних структур із від'ємним опором [3, с. 102]. Для досягнення поставленої мети в статті потрібно вирішити такі задачі: 1) запропонувати рівняння апроксимації статичних ВАХ транзисторної структури Λ -типу; 2) обґрунтувати математичну модель радіотехнічного пристрою на основі транзисторної структури з від'ємним опором; 3) отримати результати математичного моделювання; 4) зробити висновки щодо проведеного дослідження.

Виклад основного матеріалу дослідження. Еквівалентна схема радіотехнічного пристрою

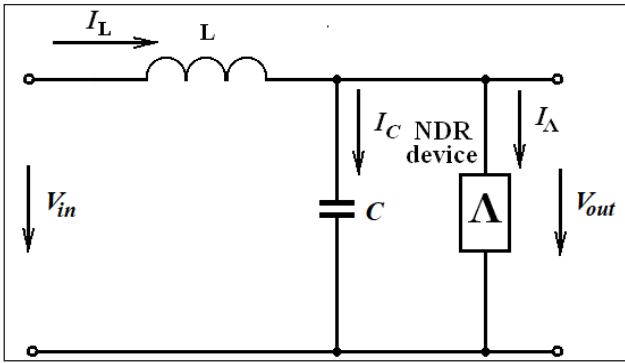


Рис. 1. Еквівалентна схема радіотехнічного пристрою на основі транзисторної структури з від’ємним опором із ВАХ Λ -типу [4, с. 2]

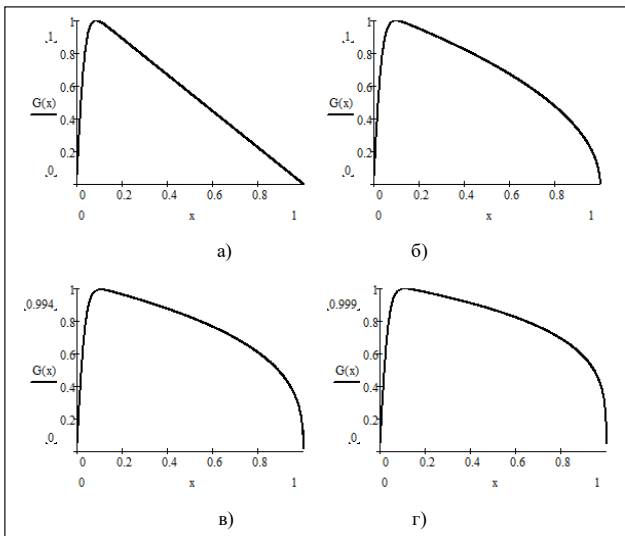


Рис. 2. Графік різних форм ВАХ із рівняння (1) за: а) $n = 1$; б) $n = 2$; в) $n = 3$; г) $n = 4$

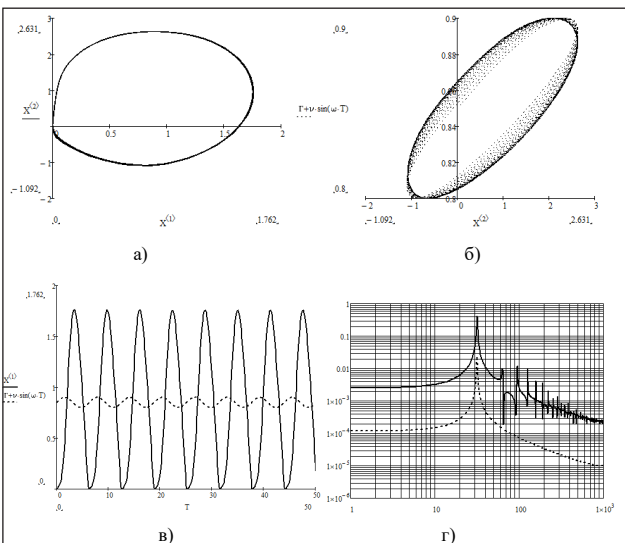


Рис. 3. Результати математичного моделювання режиму підсилення: а) фазовий портрет; б) фігура Ліссажу; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруг

на основі транзисторної структури з від’ємним опором із ВАХ Λ -типу подана на рис. 1 [4, с. 2]. Основними елементами схеми є двохелектродна транзисторна структура з від’ємним опором та послідовний коливальний контур [4, с. 2; 5, с. 5225].

Нелінійна динаміка коливань у радіотехнічному пристрої залежить від геометричної форми ВАХ транзисторної структури з від’ємним опором. Для апроксимації статичних ВАХ застосовують рівняння з використанням функції гіперболічного тангенса. У роботі [3, с. 167; 3, с. 206] автором запропоновано такі рівняння у фізичних величинах (напругах і струмах). У цій роботі автором пропонується рівняння апроксимації ВАХ у безрозмірних змінних, які нормовані до напруг і струмів геометричних точок реальної ВАХ вигнутих догори [3, с. 102] біполярних транзисторних структур із від’ємним опором:

$$G(x) = 2,029 \cdot 10^{-3} x + M \sqrt[n]{1 - 1,002x} \tanh\left(\frac{25x}{1 - 1,002x}\right), \quad (1)$$

де n – ціле додатне число ($n \neq 0$); M – масштабний коефіцієнт графіка нормованої ВАХ. За вигнутої догори ВАХ користуються рівнянням (1): якщо $n = 1$, тоді $M = 1,114$ (рис. 1, а); якщо $n = 2$, тоді $M = 1,062$ (рис. 1, б); якщо $n = 3$, тоді $M = 1,037$ (рис. 1, в); якщо $n = 4$, тоді $M = 1,033$ (рис. 1, г).

Система рівнянь Кірхгофа для електричного кола на рис. 1 має такий вигляд [4, с. 2]:

$$\begin{cases} \frac{dv_C}{dt} = \frac{1}{C}(i_L - i_{NDR}) = \frac{1}{C}[i_L - G(v_C)], \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_{IN} - v_C). \end{cases} \quad (2)$$

Де вхідна напруга [4, с. 2; 5, с. 5225]:

$$V_{IN} = E_{DC} + E_A \sin(\omega_{IN} t), \quad (3)$$

E_{DC} – це напруга зміщення, для встановлення робочої точки на спадній ділянці ВАХ; E_A , ω_{IN} – амплітуда та кругова частота зовнішньої синусоїдальної дії відповідно.

У нормованих змінних система рівнянь (2) має такий вигляд [4, с. 2]:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{\varepsilon}[x_2 - G(x_1)], \\ \frac{dx_2}{dt} = \varepsilon[\Gamma + v \cdot \sin(\omega t) - x_2]. \end{cases} \quad (4)$$

Де рівняння нормованих змінних і коефіцієнтів системи мають вигляд [4, с. 2]:

$$x_1 = \frac{v_C}{E_M}, \quad x_2 = \frac{i_L}{I_M}, \quad T = \frac{t}{\sqrt{LC}}, \quad \omega = \omega_{IN} \sqrt{LC}, \quad (5)$$

$$\Gamma = \frac{E_{DC}}{E_M}, \quad v = \frac{E_A}{E_M}, \quad \varepsilon = \frac{E_M/I_M}{\sqrt{L/C}},$$

де E_M , I_M – координати точки максимуму струму та напруги на графіку ВАХ транзисторної структури з від’ємним опором [8].

У роботі автором отримано результати математичного моделювання неавтономного радіотехнічного пристрою на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором у різних режимах роботи. Як варіант за основу обрано форму ВАХ транзисторної структури за $n=3$ (рис. 2, в). Математичне моделювання пристрою здійснено для таких режимів:

- 1) режим підсилення за коефіцієнтів (5) динамічної системи (4): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,85$, $\nu = 0,05$, $\omega = 1,0$. Результати моделювання – на рис. 3;
- 2) режим ділення частоти на 2 за коефіцієнтів (5) динамічної системи (4): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,2$, $\nu = 0,2$, $\omega = 2,0$. Результати моделювання – на рис. 4;
- 3) режим ділення частоти на 3 за коефіцієнтів (5) динамічної системи (4): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,14$,

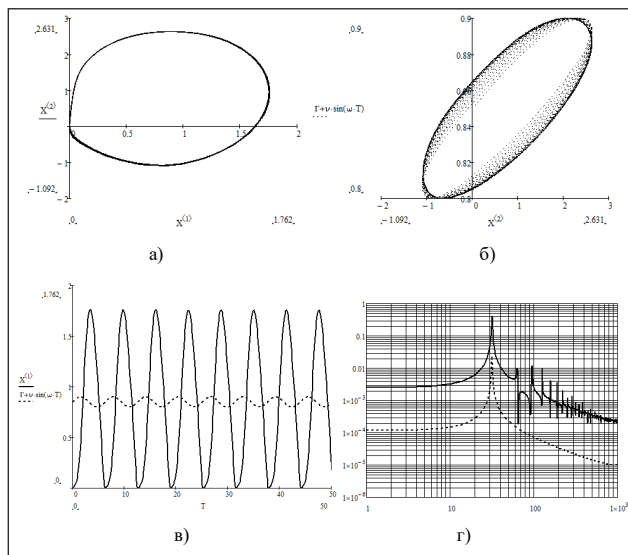


Рис. 4. Результати математичного моделювання режиму ділення частоти на 2: а) фазовий портрет; б) фігура Ліссажу; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруги

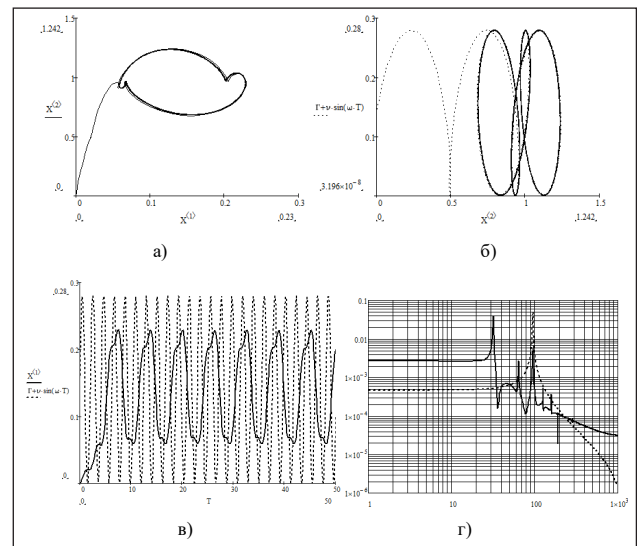


Рис. 5. Результати математичного моделювання режиму ділення частоти на 3: а) фазовий портрет; б) фігура Ліссажу; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруги

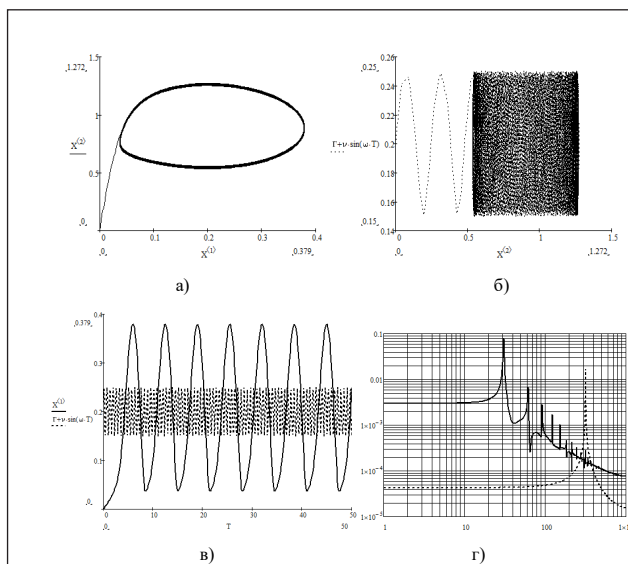


Рис. 6. Результати математичного моделювання режиму ділення частоти на 10: а) фазовий портрет; б) фігура Ліссажу; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруги

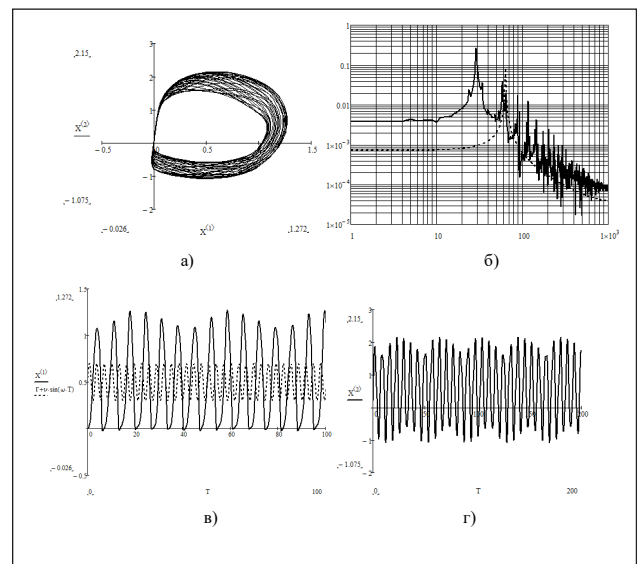


Рис. 7. Результати математичного моделювання режиму амплітудної модуляції сигналу: а) фазовий портрет; б) амплітудо-частотний спектр нормованих вхідної та вихідної напруги; в) часова діаграма нормованих вхідної та вихідної напруги; г) часова діаграма нормованого струму індуктивності

$\nu = 0,14$, $\omega = 3,0$. Результати моделювання – на рис. 5;

4) режим ділення частоти на 10 за коефіцієнтів (5) динамічної системи (4): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,2$, $\nu = 0,05$, $\omega = 10,0$. Результати моделювання – на рис. 6;

5) режим амплітудної модуляції за коефіцієнтів (5) динамічної системи (4): $\varepsilon = 2$, $\Gamma = 0,5$, $\nu = 0,2$, $\omega = 2,0$. Результати моделювання – на рис. 7.

Висновки. У роботі отримано результати теоретичних досліджень і математичного моделювання неавтономного радіотехнічного пристрою формування сигналів на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Досліджено динаміку електричних коливань у режимах підсилення, ділення частоти й амплітудної моду-

ляції сигналу. Режимими роботи та параметрами електричних коливань можна ефективно керувати шляхом зміни положення робочої точки на спадній ділянці статичної ВАХ, а також величиною амплітуди та частоти вхідного синусоїдального сигналу. Модельні дослідження показали стійку роботу радіотехнічного пристрою в зазначених режимах. Перевагами радіотехнічних пристроїв формування сигналів на основі транзисторних структур із від'ємним опором є високий рівень вихідного сигналу порівняно із класичними. Як недоліки досліджених радіотехнічних пристроїв варто зазначити обмежену нелінійну динаміку транзисторних структур із ВАХ Λ -типу з вигином догори порівняно із класичною формою ВАХ Λ -типу з вигином донизу.

Список літератури:

1. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Барабан С.В. Радіовимірювальні перетворювачі на основі транзисторних структур із від'ємним опором для неруйнівного теплового контролю. Вінниця: ВНТУ, 2015. 212 с. ISBN 978-966-641-599-1.
2. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Савицький А.Ю. Радіовимірювальні перетворювачі вологості на основі МДН-структур. Вінниця: ВНТУ, 2016. 152 с. ISBN 978-966-641-649-3.
3. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Семенов А.О., Коваль К.О. Функціональні вузли радіовимірювальних приладів на основі реактивних властивостей транзисторних структур із від'ємним опором. Вінниця: ВНТУ, 2011. 336 с. ISBN 978-966-641-405-5.
4. Núñez Juan, Avedillo María J., José M. Quintana. Bifurcation Diagrams in MOS-NDR Frequency Divider Circuits. 19th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS), 9–12 Dec. 2012, Seville, Spain. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICECS.2012.6463558.
5. Kwang-Jow Gan, Kuan-Yu Chun, Wen-Kuan Yeh, Yaw-Hwang Chen, Wein-So Wang. Design of Dynamic Frequency Divider using Negative Differential Resistance Circuit. International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. Vol. 3. Issue 8. August 2015. P. 5224–5228. DOI: 10.17762/ijritcc2321-8169.150833.
6. Kennedy Michael Peter, Li Zhida, Huang Zhen. Programmable analog frequency divider based on ρ -switching. Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE. Vol. 4. № 4. 1 Oct. 2013. P. 389–399. DOI: 10.1587/nolta.4.389.
7. Новиков С.Г., Гурин Н.Т., Беринцев А.В., Родионов В.А., Штанько А.А. Полупроводниковые приборы с отрицательным сопротивлением на передаточной вольт-амперной характеристике. Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 6. С. 59–68.
8. Семенов А.О., Осадчук О.В. Генератор детермінованого хаосу з інерційною нелінійністю на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2017. № 6. С. 147–152.

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРНЫХ СТРУКТУР С ОТРИЦАТЕЛЬНОМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

В работе приведены результаты теоретических исследований и математического моделирования радиотехнического устройства формирования сигналов на основе биполярной транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Предложено новое уравнение аппроксимации статической вольт-амперной характеристики биполярной транзисторной структуры с отрицательным сопротивлением. Рассмотрена простая аналоговая схема радиотехнического устройства для формирования сигналов. Предложена математическая модель устройства. Исследована динамика периодических колебаний в режимах усиления, деления частоты и амплитудной модуляции входного сигнала. Получены фазовые портреты, фигуры Лиссажу, временные диаграммы и амплитудно-частотные спектры входного и выходного напряжения.

Ключевые слова: транзисторная структура, отрицательное сопротивление, математическая модель, электрические колебания, фазовый портрет.

MODEL RESEARCH OF THE NON-LINEAR DYNAMICS OF RADIO-ENGINEERING DEVICES BASED ON A TRANSISTOR STRUCTURE WITH NEGATIVE RESISTANCE

The paper presents results obtained after theoretical investigating and mathematical modelling a radio-engineering device for forming signals based on a bipolar transistor structure with negative resistance. A new equation for approximating the static I - V curve of the bipolar transistor structure with negative resistance was proposed. A simple analogue circuit of the radio-engineering device for forming signals was considered. A mathematical model of the device was suggested. Dynamics of the periodic oscillation was examined in modes of amplification, frequency division, and input signal amplitude modulation. Phase portraits, Lissajous curves, time diagrams, amplitude-frequency spectra of input and output voltages were obtained.

Key words: *transistor structure, negative resistance, mathematical model, electrical oscillation, phase portrait.*

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 681.51

Андрощук А.В.

Одесский национальный политехнический университет

Тарахтий О.С.

Одесский национальный политехнический университет

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ТОПЛИВА ВВЭР-1000 С ПОДДЕРЖАНИЕМ ПОСТОЯННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Обоснована необходимость разработки и внедрения автоматизированной системы управления свойствами ядерного топлива в процессе эксплуатации реактора типа ВВЭР-1000 с постоянной средней температурой теплоносителя первого контура. Рассмотрены принципы моделирования изменения свойств твэлов со временем для нормальных условий эксплуатации реактора. Показано, что управляющими воздействиями в автоматизированной системе управления свойствами ядерного топлива будут изменены положения в активной зоне регулирующих органов системы управления, а также расположение тепловыделяющих сборок в ячейках активной зоны в ходе плановых перегрузок ядерного топлива.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, свойства ядерного топлива, реактор ВВЭР-1000, активная зона, средняя температура теплоносителя.

Постановка проблемы. Из 15 действующих энергоблоков НАЭК «Энергоатом» 13 энергоблоков созданы на основе реактора типа ВВЭР-1000. В настоящее время реакторные установки (далее – РУ) с ВВЭР-1000 эксплуатируются преимущественно в проектом, т. е. базовом режиме – на постоянном уровне мощности 100% от номинала. Необходимость эксплуатации РУ с ВВЭР-1000 в маневренном режиме следует из весьма значительной доли выработки электроэнергии реакторами этого типа, а также из необходимости адаптации энергоблоков АЭС к условиям работы в современных и перспективных энергосистемах. Эти условия состоят в том, что, если доля выработки электроэнергии на АЭС в объединенной энергосистеме (далее - ОЭС) страны близка к 50% и сокращается доля электрогенерирующих установок, работающих в полупиковом режиме, нарушается баланс между выработкой и потреблением электроэнергии в ОЭС [1].

Поскольку новые полупиковые генерирующие мощности своевременно не вводятся в экс-

плуатацию, необходимо участие уже существующих ядерных энергоустановок в регулировании частоты и мощности в ОЭС страны. Согласно регламенту, энергоблок с ВВЭР-1000 допустимо эксплуатировать в маневренном режиме, если это не снижает надежность, безопасность и экономическую эффективность эксплуатации РУ. Важно отметить, что оборудование первого контура РУ с ВВЭР-1000 (В-320) рассчитано на возможность эксплуатации в режиме регулирования частоты и мощности в ОЭС с допускаемым количеством циклов набора и снижения нагрузки, равным 10 000 в пределах регулировочного диапазона 30–100% от номинальной мощности [1].

Однако на АЭС НАЭК «Энергоатом» не внедрено стандартных методов расчета величины параметра деформационной поврежденности материала оболочек твэлов $\omega(\tau)$, накопленной на текущий момент времени, а также на момент разгерметизации оболочек твэлов, принимая во внимание историю нагружения конкретной

тепловыделяющей сборки (далее – ТВС), т. е. точную последовательность совокупностей эксплуатационных параметров, определяющих величину $\omega(\tau)$ для данной ТВС. На действующих АЭС с ВВЭР-1000 НАЭК «Энергоатом» не внедрены технологии для локализации разгерметизированных оболочек твэлов в ТВС и локализации аксиальных сегментов (далее – АС) оболочек твэлов, в которых произошла разгерметизация. Как следствие, невозможно учитывать влияние технологических процедур, например, алгоритма перестановок ТВС в активной зоне (далее – АКЗ), на вероятность разгерметизации оболочек твэлов [2].

Поскольку процедуры текущего контроля накопленной деформационной поврежденности оболочек твэлов реактора ВВЭР-1000 не разработаны и не внедрены, в настоящее время на АЭС НАЭК «Энергоатом» с ВВЭР-1000 невозможно гарантировать поддержание свойств ядерного топлива (далее – ЯТ) в регламентных пределах. С точки зрения системного подхода, текущий контроль накопленной деформационной поврежденности оболочек твэлов является составной частью контроля свойств ЯТ, неразрывно связанного с автоматизированным управлением свойствами ЯТ [1].

Анализ последних исследований и публикаций. В данной публикации предложены состав и структура автоматизированной системы управления свойствами топлива реактора ВВЭР-1000, что обеспечивает баланс между безопасностью и экономичностью эксплуатации ЯТ. Предложена автоматизированная система управления свойствами ЯТ реактора ВВЭР-1000 с учетом параметра деформационного повреждения оболочек твэлов, глубины выгорания ЯТ и аксиального офсета.

Постановка задания. Целью работы является разработка технологических основ автоматизированного управления свойствами ЯТ, при его эксплуатации в переменном режиме нагружения, для повышения безопасности и эффективности эксплуатации РУ с ВВЭР-1000.

Изложение основного материала исследования. В работе использовались такие методы: моделирование изменения параметра поврежденности оболочки твэла $\omega(\tau)$ со временем; метод управления свойствами твэлов при эксплуатации РУ; методы системного анализа и теории автоматического управления.

Моделирование изменения поврежденности оболочки твэла со временем. Метод расчета $\omega(\tau)$ на основе энергетического варианта теории ползучести (далее – ЭВП) позволяет для нормальных условий эксплуатации твэла реактора типа ВВЭР-

1000 учесть основной процесс, вызывающий рост $\omega(\tau)$ и параметры, определяющие скорость этого роста. Положения ЭВП-метода [1]:

- при управлении свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации ВВЭР-1000 влияние на долговечность оболочек твэлов таких факторов, как МВТО при малых выгораниях ЯТ, механическое повреждение оболочек вследствие коррозионного растрескивания под напряжением, коррозия в области глубоких выгораний, а также пластическая деформация оболочек, может быть минимизировано путем оптимизации регламента эксплуатации РУ и технологии производства твэлов на основе уже известных методов;

- наиболее существенным для дальнейшего повышения безопасности эксплуатации твэлов путем управления их свойствами является корректное описание процесса разгерметизации оболочки, вызванного комбинацией многократных циклических и долговременных стационарных нагружений [3];

- для управления свойствами твэлов необходимо контролировать поврежденность оболочек $\omega(\tau)$, накопленную в нормальных условиях эксплуатации РУ и вызванную совместным действием ползучести и усталости;

- поскольку ползучесть определяет процесс деформации оболочки твэла при стационарных и переменных (с частотой циклического нагружения оболочки $\nu \ll 1$ Гц) режимах нормальной эксплуатации, метод расчета условий разгерметизации оболочки должен быть построен на основе учета ползучести как основного процесса деформации оболочки с помощью ЭВП, согласно которому процессы разрушения и ползучести в оболочке протекают совместно и влияют друг на друга;

- в любой момент времени τ интенсивность разрушения оболочки оценивается через удельную энергию рассеяния $A(\tau)$, накопленную на данный момент в процессе ползучести;

- лимитирующий компонент A_0 критерия разрушения оболочки не зависит от последовательности совокупностей условий нагружения оболочки, в т. ч. от метода маневрирования мощностью РУ N , последовательности уровней мощности N , размещения органов регулирования (далее – ОР) системы управления и защиты (далее – СУЗ) в АКЗ, алгоритма перестановок ТВС в АКЗ и определяется исключительно свойствами материала оболочки;

A_0 находится как $A(\tau)$, рассчитанная на основе ЭВП-модели изменения свойств твэла в момент начала разрушения оболочки τ_0 , при выполне-

нии предельного условия для самого внутреннего радиального элемента в анализируемом АС оболочке, являющегося самым напряженным:

$$\lim(dA / d\tau)^{-1} \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad \tau \rightarrow \tau_0. \quad (1).$$

Метод управления свойствами твэлов при эксплуатации РУ. Метод управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР-1000 характеризуется учетом поврежденности оболочек в нормальных условиях их эксплуатации, балансом безопасности и экономичности эксплуатации твэлов, итерационным заданием главных факторов, детерминирующих процесс накопления микротрещин в оболочках твэлов, который численно описывается параметром поврежденности $\omega(\tau)$ [4; 5].

Метод управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР-1000 включает в себя два метода [1]:

1) Метод управления свойствами твэлов на стадии проектирования ВВЭР-1000, состоящий из методов управления конструкционными параметрами твэла и расположением регулирующей группы СУЗ в АКЗ.

2) Метод управления свойствами твэлов на стадии эксплуатации ВВЭР-1000, включающий методы управления температурным режимом теплоносителя, перестановками ТВС в АКЗ и балансом стационарного и переменного нагружения РУ.

В методе управления свойствами твэлов учитывается влияние таких главных факторов, детерминирующих контролируемые параметры, как конструкционные параметры твэлов, ТВС и АКЗ, а также режимные параметры: максимальная линейная мощность в твэле $q_{l,max}$ и температура теплоносителя на входе АКЗ $t_{вх}$.

В качестве контролируемых параметров в системе управления свойствами ЯТ используются:

1) Параметр поврежденности оболочек твэлов $\omega(\tau)$ – описывает безопасность эксплуатации твэлов.

2) Глубина выгорания ядерного топлива $B(\tau)$ – описывает экономичность эксплуатации твэлов.

3) Аксиальный офсет $A(\tau)$ поля энерговыделения в АКЗ – описывает безопасность и экономичность эксплуатации твэлов.

На основе учета эволюции микроструктуры оболочек твэлов при нормальной эксплуатации ЯТ возможно сконструировать критерий эффективности управления свойствами ЯТ, дающий целевую функцию оптимизации параметров реактора в виде:

$$Eff = f(\omega^*, B^*, AO^*), \quad (2),$$

где ω^* , B^* и AO^* – безразмерные максимальные параметры поврежденности оболочек твэлов, средняя глубина выгорания ЯТ по ТВС какого-либо алгоритма перестановок ЯТ и максимальный аксиальный офсет для заданного температурного режима теплоносителя.

В результате итерационной оптимизации температурного режима теплоносителя, алгоритма перестановок ТВС в АКЗ, а также баланса стационарного и переменного нагружения РУ:

$$Eff \rightarrow \max\{Eff\} \text{ if } \begin{cases} \omega^* \rightarrow \max\{\omega^*\}; \\ B^* \rightarrow \max\{B^*\}; \\ AO^* \rightarrow \max\{AO^*\}. \end{cases} \quad (3)$$

Физический смысл критерия (3) заключается в том, что он позволяет достигать одновременно минимума параметра поврежденности оболочек, максимальной равномерности выгорания ЯТ среди ТВС алгоритма перестановок ТВС в АКЗ, а также максимальной стабильности аксиального офсета, а значит и поля энерговыделения в АКЗ [1].

Результаты. В настоящее время известны два основных метода регулирования мощности энергоблока с ВВЭР-1000, характеризующие значения технологических параметров в стационарных режимах энергоблока [2]:

1) Метод с постоянным давлением пара в парогенераторе второго контура $p_2 = \text{const}$.

Хотя метод регулирования мощности энергоблока с $p_2 = \text{const}$ обеспечивает наиболее благоприятные условия для работы парогенерирующего оборудования второго контура, однако, ввиду переменности средней температуры теплоносителя в первом контуре:

– требуется компенсатор давления увеличенных размеров;

– возникают повышенные температурные напряжения в корпусе ЯР, а также в оболочках твэлов;

– для компенсации изменений реактивности за счет температурного эффекта требуется воздействие на ОР СУЗ, что может привести к изменению поля энерговыделения в АКЗ.

2) Метод с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре $\langle t_1 \rangle = \text{const}$.

Недостатком метода регулирования мощности энергоблока с $\langle t_1 \rangle = \text{const}$ является повышение давления пара во втором контуре при снижении мощности энергоблока, что требует проектирования парогенераторов и главных паропроводов для работы с давлением, превышающим номинальное.

Однако метод с $\langle t_1 \rangle = \text{const}$ имеет такие важные преимущества:

– наиболее благоприятные условия для работы оборудования первого контура;

– возможность саморегулирования процессов в АКЗ реактора за счет температурного эффекта реактивности;

– минимизация воздействия на ОР СУЗ;

– стабильность поля энерговыделения в АКЗ.

Принимая во внимание отмеченные преимущества метода регулирования мощности энергоблока с $\langle t_1 \rangle = \text{const}$, напрямую влияющие на безопасность и экономическую эффективность эксплуатации ЯТ, примем, что средняя температура теплоносителя в АКЗ в ходе маневра мощностью реактора поддерживается постоянной. Тогда АСУ свойствами ЯТ в процессе эксплуатации реактора типа ВВЭР-1000 будет включать следующие основные контуры управления:

– управление свойствами ЯТ за счет оптимизации алгоритма перестановок ТВС в АКЗ;

– управление свойствами ЯТ за счет оптимизации баланса стационарного и переменного нагружения РУ.

Рассмотрим некоторые основные элементы перспективной АСУ свойствами ЯТ реактора типа ВВЭР-1000 с точки зрения теории автоматического управления.

1. Объект управления – АКЗ.

2. Регулируемые величины:

– уровень мощности реактора;

– энерговыделение и температура ЯТ в каждой ячейке АКЗ;

– температура теплоносителя на входе и выходе АКЗ реактора.

3. Контролируемые параметры:

– параметр поврежденности оболочек ТВЭлов $\omega(\tau)$;

– глубина выгорания ЯТ $B(\tau)$;

аксиальный офсет $A(\tau)$ поля энерговыделения в АКЗ.

4. Управляющие воздействия:

– изменение глубины погружения ОР СУЗ в АКЗ,
– изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе;

– изменение расположения ТВС в ячейках АКЗ в ходе плановых перегрузок ЯТ.

Выводы.

1) Для поддержания баланса генерирующих и потребляющих мощностей в энергосистеме

Украины, путем перевода энергоблоков АЭС с ВВЭР-1000 НАЭК «Энергоатом» в маневренный режим эксплуатации, необходимо разработать и внедрить АСУ свойствами ЯТ в процессе эксплуатации реактора типа ВВЭР-1000, что обеспечит удовлетворение требований регламента к надежности и безопасности эксплуатации ядерных энергоблоков при минимальном участии эксплуатационного персонала.

2) При управлении свойствами ТВЭлов в нормальных условиях эксплуатации реактора типа ВВЭР-1000, для моделирования изменения параметра поврежденности оболочек ТВЭлов $\omega(\tau)$ со временем целесообразно использовать ЭВП-метод расчета $\omega(\tau)$, который позволяет для нормальных условий эксплуатации ТВЭлов учесть основной процесс накопления параметра поврежденности оболочек ТВЭлов и определяющие $\omega(\tau)$ параметры.

3) Управлять свойствами ТВЭлов на стадии эксплуатации реактора типа ВВЭР-1000 возможно путем оптимизации температурного режима теплоносителя, перестановок ТВС в АКЗ, а также баланса стационарного и переменного нагружения РУ, при этом целевая функция оптимизации параметров реактора будет включать безразмерные параметр поврежденности оболочек ТВЭлов, глубину выгорания ЯТ и аксиальный офсет.

4) Принимая во внимание такое преимущество метода регулирования мощности энергоблока с постоянной средней температурой теплоносителя в первом контуре $\langle t_1 \rangle = \text{const}$, как наиболее благоприятные условия для эксплуатации ЯТ АСУ свойствами ЯТ в процессе эксплуатации реактора типа ВВЭР-1000, целесообразно разработать для метода регулирования мощности энергоблока с $\langle t_1 \rangle = \text{const}$.

5) Оптимальные показатели безопасности и эффективности эксплуатации ЯТ реактора типа ВВЭР-1000 будут достигаться за счет внедрения АСУ свойствами ЯТ, в которой управляющими воздействиями будут изменение глубины погружения ОР СУЗ в АКЗ, изменение концентрации борной кислоты в теплоносителе и изменение расположения ТВС в ячейках АКЗ в ходе плановых перегрузок ЯТ.

Список литературы:

1. Пельх С.Н. Основы управления свойствами ТВЭлов ВВЭР. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. 160 с.

2. Пелих С.М., Фролов М.О., Наливайко А.В., Хуйю Чжоу. Автоматизована система керування властивостями ядерного палива ВВЕР-1000 з урахуванням параметра пошкодження оболонок твелів. Збірник «Наукові праці». Одеса, 2017. С. 1.

3. Овчинников Ф.Я. Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов. Москва, 1988. 359 с.
4. Review of fuel failures in water cooled reactors. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-2.1. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. 191 p.
5. Соснин О.В. Энергетический вариант теории ползучести Новосибирск, 1986. 95 с.
6. Сузуки М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения. Одесса, 2010. 248 с.

СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ПАЛИВА ВВЕР-1000 З ПІДТРИМАННЯМ ПОСТІЙНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ

Обґрунтовано необхідність розробки і впровадження автоматизованої системи керування властивостями ядерного палива в процесі експлуатації реактора типу ВВЕР-1000 з постійною середньою температурою теплоносія першого контуру. Розглянуто принципи моделювання зміни властивостей твєлів з часом для нормальних умов експлуатації реактора. Показано, що керуючими впливами в автоматизованій системі керування властивостями ядерного палива будуть зміна положення в активній зоні регулюючих органів системи управління.

Ключові слова: автоматизована система керування, властивості ядерного палива, реактор ВВЕР-1000, активна зона, середня температура теплоносія.

THE SYSTEM FOR CONTROL OF VVER-1000 FUEL PROPERTIES WHEN KEEPING THE COOLANT TEMPERATURE CONSTANT

The necessity of the development and introduction of the automated control system of nuclear fuel properties during the operation of the WWER-1000 type reactor with the constant average temperature of the heat carrier of the first circuit was substantiated. The principles of modeling the change of the properties of telescopes with time for the normal conditions of operation of the reactor are considered. It is shown that the controlling influence in the ASA on the properties of the DP will change the position in the active zone of the regulatory authorities of the control system.

Key words: automated control system, nuclear fuel properties, VVER-1000 reactor, active zone, average coolant temperature.

Андрущенко В.Б.

Інститут проблем реєстрації інформації НАН України

НОВІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОШУКУ Й ОБРОБКИ ДАНИХ РЕСУРСУ ПРЕПРИНТІВ ARXIV

Стаття присвячена новим технологіям роботи з ресурсом відкритого доступу – архівом препринтів arXiv. За рахунок представлення даних, що містить ресурс у вигляді моделі «Концепт – система наукових напрямків», розроблено та представлено алгоритм роботи з ресурсом і виокремлено нові масиви інформації, які було сформовано шляхом застосування методів text mining до результатів пошуку на ресурсі за заданим концептом. У статті подано результати апробації алгоритму, їх візуалізація у середовищі Gephi та запропоновано підходи до інтерпретації отриманих даних. Також було представлено шляхи розвитку реалізованої задачі.

Ключові слова: архів препринтів, концепт, науковий напрямок, публікація, граф.

Постановка проблеми. Сьогодні наукометрія є одним з основних і допоміжних інструментів для організації та проведення аналізу результативності наукової діяльності окремого вченого, творчого колективу та організації. Вона є мірилом визначення успішності реалізації грантових програм як у межах країни, так і в світовому науковому просторі.

Згідно з Законом України «Про наукову та науково-технічну діяльність» (ст. 11, п. 2, пп. 3), оцінка наукової та науково-технічної діяльності й атестація здійснюються з урахуванням наукометричних показників.

Широкий спектр наукометричних показників дозволяє провести оцінку наукової роботи шляхом моніторингу публікаційної активності та цитованості. Загальноприйнятими у світі є два провідних наукометричних ресурси – «Scopus» (компанія – Elsevier, Нідерланди) та «Web Of Science» (компанія – Clarivate Analytics, Сполучені Штати Америки). Варто підкреслити, що доступ до цих ресурсів є передплатним. Натомість більшість наукових установ та освітніх закладів для оцінки наукового складника організації звертаються до показників наукометричного ресурсу компанії Google (Сполучені Штати Америки) – Google Scholar.

Водночас актуальним залишається отримання додаткової інформації та розробка нового інструментарію на базі наукометричних ресурсів і ресурсів наукової інформації відкритого доступу, не тільки для оцінки та моніторингу діяльності вчених, колективів та установ, а і, за рахунок

синергії даних, для отримання нових підходів для пошуку міждисциплінарних зав'язків, що є одним із актуальних засобів формування міжнародних колаборацій, привернення уваги міжнародної наукової спільноти до наукових досліджень України та спільної реалізації грантових програм.

Також варто зауважити, що значна увага приділена розробці підходів для оцінки стану науки, аналізу діяльності науковців і методологічних підходів до розробки стратегій розвитку наукової сфери в Україні.

Одним із найбільш популярних ресурсів для розміщення результатів досліджень є ресурс препринтів Корнуельської бібліотеки – arXiv – найбільший архів електронних публікацій і їх препринтів відкритого доступу.

Репозитарій було запроваджено у 1991 р. Роботу ресурсу було спрямовано на розміщення публікацій, підготовлених до друку, за напрямком «Фізика», але сьогодні ресурс постійно розширюється, додаються нові розділи та відповідні підрозділи з інших наукових напрямків. arXiv є допоміжним інструментарієм для науковців в усьому світі. Ресурс є актуальним інструментом для користувачів із країн з обмеженим доступом до наукової інформації за рахунок можливості користування дзеркалами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Досі всю увагу до ресурсу та досліджень на базі нього було зосереджено на впровадженні протоколів відкритого доступу на базі архіву препринтів [1] і способам виявлення плагіату в рамках ресурсу [2].

Водночас arXiv становить базу наукових препринтів та опублікованих праць за різними науковими напрямками, що оновлюється щоденно і містить найновіші результати досліджень із різних галузей знань.

Ресурсом передбачено процедура схвалення (endorsement) статті перед опублікуванням із залучення експертів із різних наукових напрямків.

Доступність ресурсу всім користувачам мережі Інтернет дає можливість застосовувати відповідні моделі для розробки та реалізації алгоритмів для отримання нових масивів інформації на базі ресурсу та подальшої інтерпретації отриманих результатів.

Постановка завдання. Основною задачею дослідження є розробка моделі «Концепт – система наукових напрямів» ресурсу препринтів arXiv для розробки, реалізації алгоритму для отримання інформації щодо публікацій за заданим концептом; відтворення у вигляді схематичних зображень результатів пошуку і проведення їх оцінки та подальшої інтерпретації.

Під концептом розуміємо [3] те, що називає зміст поняття, у цьому разі – зображення і зміст наукового явища, його характеристики, ознаку. Заданий для пошуку концепт може бути не тільки словом або словосполученням, що визначають науковий термін, характеристику наукового процесу тощо, а й власними іменами та назвами.

Сьогодні автором було запропоновано та реалізовано задачу побудови мережі предметних областей і дерева понять [4] на базі заданого концепту. Зображені у статті підходи розширюють шляхи інтерпретації отриманих результатів за рахунок апробації на окремому концепті.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для реалізації поставленої задачі необхідно виокремити перелік наукових напрямів, визначених самою системою, і перелік піднапрямків, що деталізують кожен науковий напрям.

Архів передбачає 8 розділів – наукових напрямів, за якими розподілені публікації:

1. Computer Science (41 піднапрямок)
2. Economics (1 піднапрямок)
3. Electrical Engineering and System Science (3 піднапрямки)
4. Mathematics (32 піднапрямки)
5. Physics (51 піднапрямок)
6. Quantitative Biology (10 піднапрямків)
7. Quantitative Finance (10 піднапрямків)
8. Statistics (6 піднапрямків)

Для кожного наукового напрямку було сформовано словник, який містить назву наукового напрямку і має вигляд таблиці (табл. 1), що складається з трьох полів із такою інформацією:

Таблиця 1

Частина словника «Computer Science»

№ п/п	Скорочена назва піднапрямку	Повна назва піднапрямку
1.	cs.AI	Artificial Intelligence
2.	cs.AR	Hardware Architecture
3.	cs.CC	Computational Complexity
4.	cs.CE	Computational Engineering, Finance and Science

Така необхідність виникла з огляду на те, що 17 квітня 2018 р. ресурсом було запроваджено новий пошуковий інтерфейс, який передбачає скорочене зазначення назви піднапрямку (рис. 1) в переліках результатів пошуку, тож, на відміну від попереднього представлення результатів, виникла необхідність тлумачення скороченої назви піднапрямку для подальшої коректної візуалізації результатів.

Робота розробленої системи передбачає задання концепту для пошуку та, за результатами пошуку, виокремлення наукових напрямків і піднапрямків, у рамках яких було здійснено дослідження.



Рис. 1. Сторінка результатів пошуку на ресурсі препринтів arXiv.

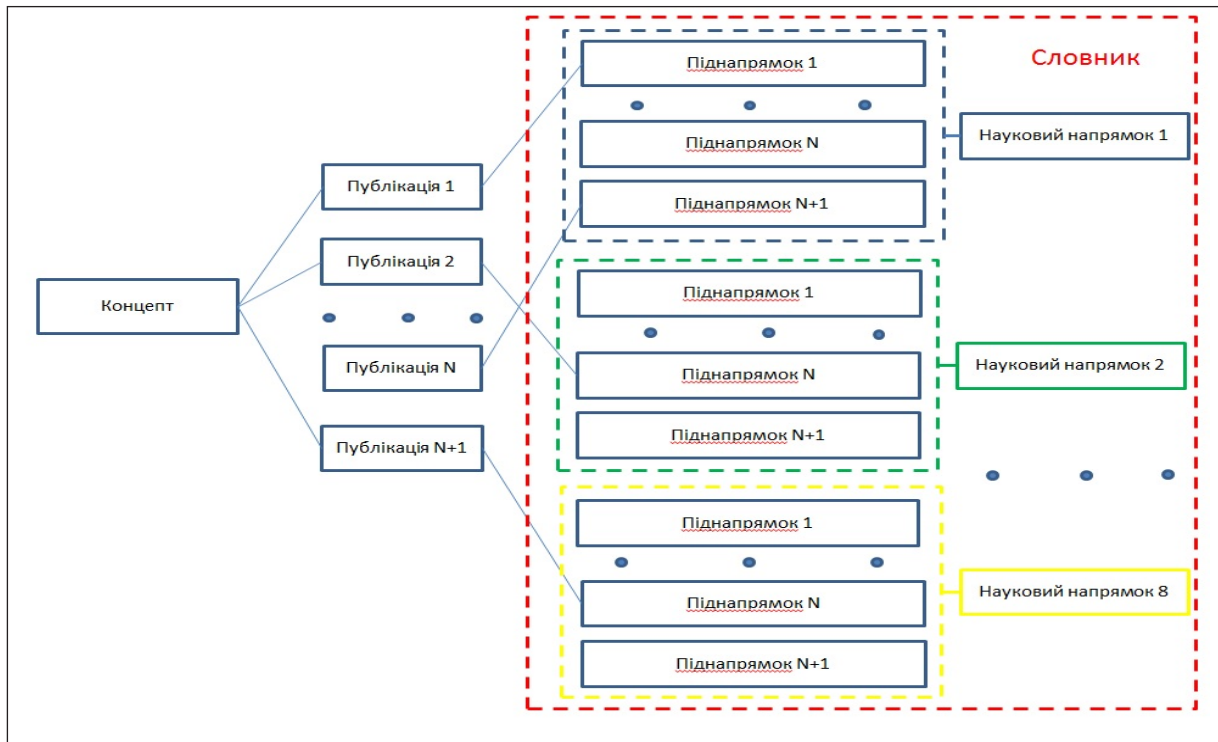


Рис. 2. Модель «Концепт-система наукових напрямків»

дження й опубліковано результати на ресурсі, і подальше представлення результатів.

Також для масиву публікацій було застосовано додатковий пошук, що виокремлює публікації, які були опубліковані в наукових виданнях.

Модель «Концепт – система наукових напрямків» можна представити у вигляді схеми (рис. 2), що становить масив наукових напрямків і піднаправків, які формують словник і безпосередньо зв’язок концепту із цими параметрами.

Алгоритм проведення дослідження представлений на рис. 3.

Для реалізації поставленої задачі було застосовано такі методи:

1. Метод аналізу текстових масивів, що застосовується для виокремлення з тексту інформації щодо наукового піднаправку, до якого віднесено публікацію, а також виокремлення публікацій, що вже опубліковані в наукових виданнях.

2. Методи математичної лінгвістики – формування словників та оцінка текстового пошуку і співставлення.

3. Методи статистичного аналізу, що дозволяє провести підрахунки співвідношення кількості публікацій – відповідно піднаправків і напрямків.

4. За теорією графів було побудовано візуалізацію результатів роботи.

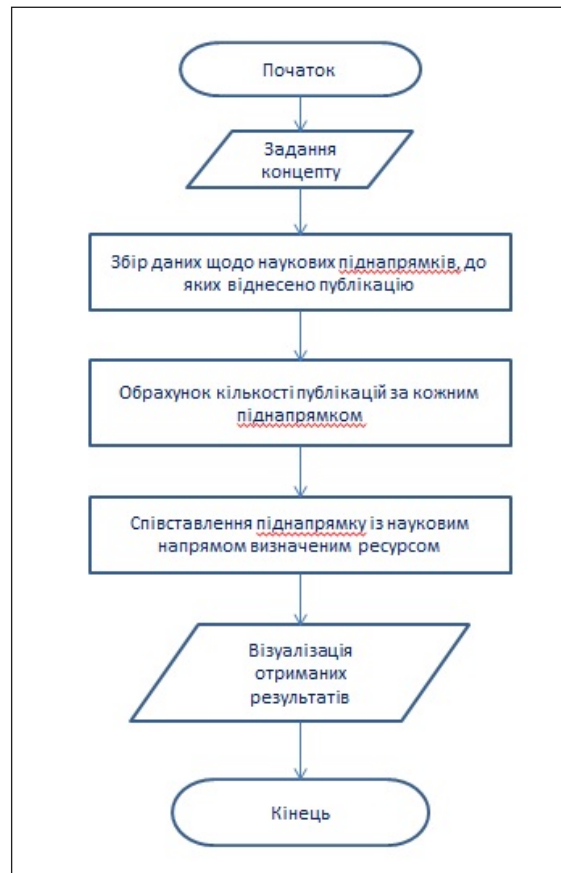


Рис. 3. Узагальнений алгоритм збору та візуалізації отриманої інформації

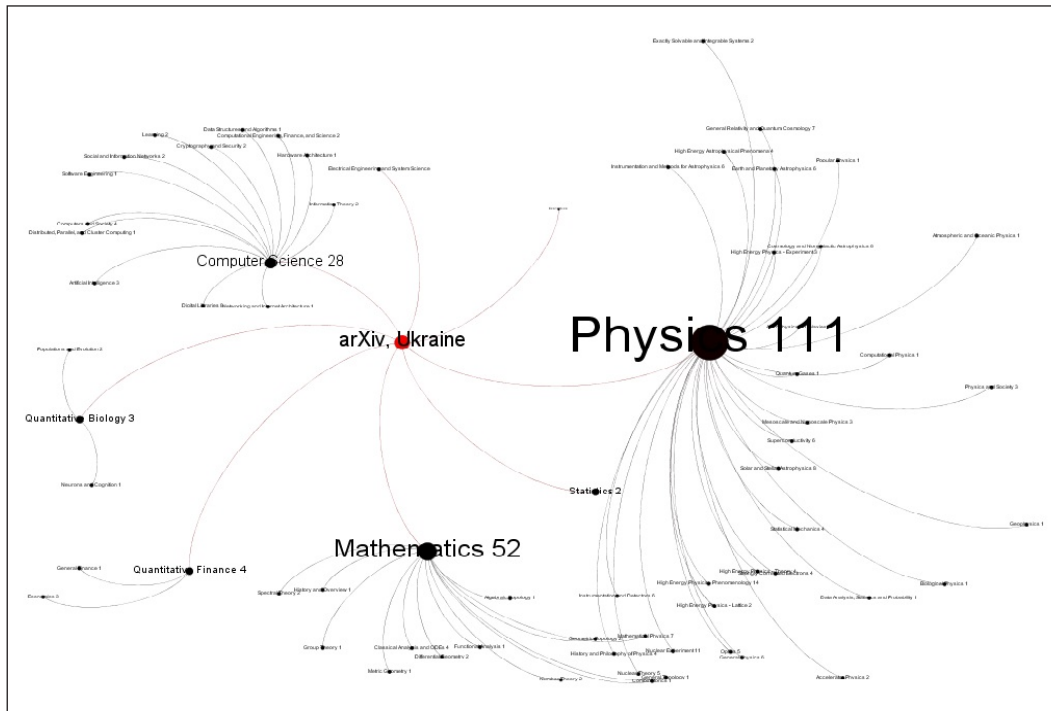


Рис. 4. Візуалізація результатів пошуку публікацій за заданим концептом на ресурсі arXiv

Задачу було вирішено для концепту «Ukraine», що дозволило отримати результати щодо кількості публікацій, афілійованих українськими інституціями, представлених на наукових заходах в Україні, а також оцінити відсоток препринтів, що були надалі опубліковані.

Алгоритм було реалізовано мовою програмування Java в середовищі Eclipse.

За заданим концептом було виокремлено 619 публікацій. До уваги було взято 200 публікацій за період 2009–2018 рр. Такий вибір щодо обсягу публікацій зумовлений актуальністю і можливістю перевірки працездатності системи – реалізації поставленої задачі.

За результатами роботи розробленої системи було отримано нові масиви інформації щодо розподілу публікацій між науковими напрямками та відповідними піднапрямами на ресурсі препринтів arXiv. За результатами отриманої інформації в середовищі Gephi було візуалізовано результати у вигляді ненаправленого графу.

Також окремий пошук було запроваджено для виокремлення переліку публікацій, розміщених на ресурсі, що вже були опубліковані та візуалізовані в середовищі Gephi.

Результатом роботи системи є отримання таких даних щодо кількості публікацій за визначеними ресурсом arXiv науковими напрямками і піднапрямами:

1. Physics – 111 публікацій за 32 піднапрямами.
 2. Mathematics – 52 публікації за 13 піднапрямами.
 3. Computer Science – 28 публікацій за 13 піднапрямами.
 4. Quantitative Finance – 4 публікації за 2 піднапрямами.
 5. Quantitative Biology – 3 публікації за 2 піднапрямами.
 6. Statistics – 2 публікації за 2 піднапрямами.
- Жодних публікацій за заданим концептом не містили напрямки Electrical Engineering and System Science та Economics.

Серед вищезазначеного масиву публікацій розміщені у наукових виданнях або опубліковані в матеріалах конференцій такі:

1. Physics – 55 публікацій за 25 піднапрямами.
2. Mathematics – 14 публікацій за 9 піднапрямами.
3. Computer Science – 14 публікацій за 8 піднапрямами.
4. Quantitative Biology – 1 публікація за 1 піднапрямом.

Вищезазначені результати було візуалізовано у вигляді ненаправленого графу (рис. 3, 4). Вершинами графу є наукові напрями і піднапрями із зазначенням кількості публікацій за заданим концептом, розміщених на ресурсі препринтів.

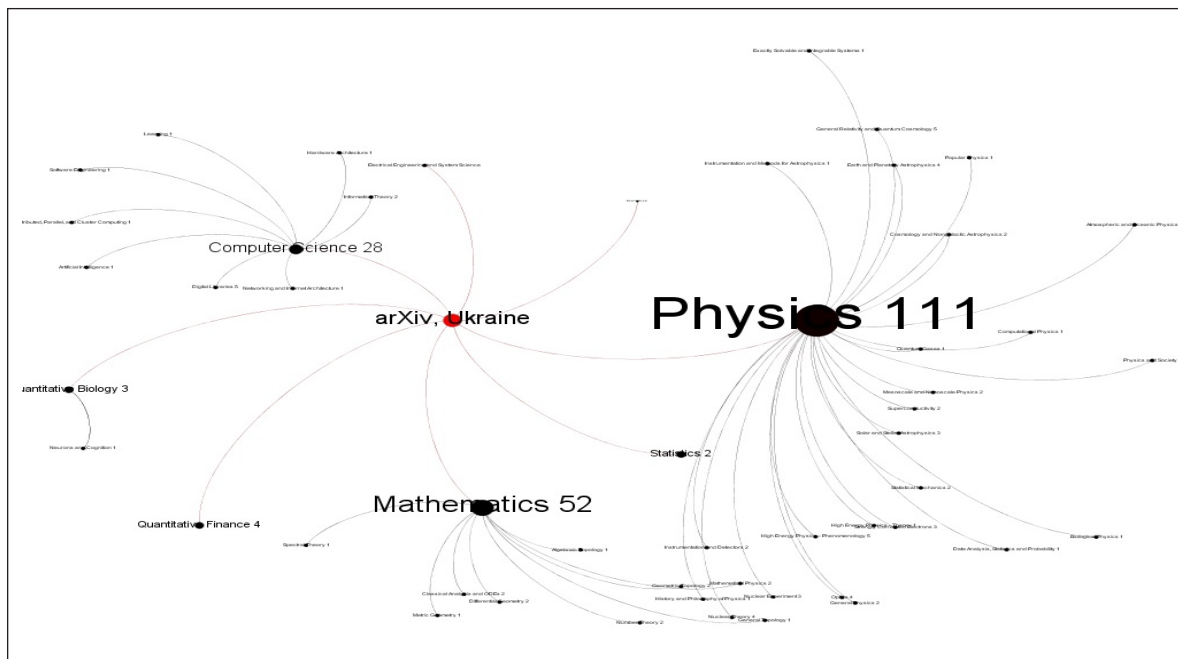


Рис. 5. Візуалізація результатів пошуку публікацій за заданим концептом, що були опубліковані в наукових журналах і матеріалах конференцій.

Графічне представлення інформації є зручним інструментом не тільки для її кращого сприйняття, але й для подальшого використання результатів.

Розмір вершин графа залежить від кількості публікацій, що відповідають науковому напрямку – таким чином одразу можна визначити найбільш популярні серед авторів наукові напрями для розміщення публікацій на ресурсі.

Візуалізація результатів пошуку препринтів за окремою схемою – тих препринтів, що були опубліковані – дає можливість оцінити, яка частка розміщених матеріалів надалі була опублікована.

Висновки. У роботі було запропоновано модель, створену на базі ресурсу препринтів arXiv «Концепт – система наукових напрямків». Також було зображено порядок роботи системи з пошуку й аналізу інформації за результатами

пошуку за заданим концептом. Обраний для апробації концепт та обсяг результатів пошуку дозволив перевірити працездатність розробленого програмного забезпечення. Результати пошуку було побудовано за такими характеристиками публікації, як науковий піднапрямок, наявність опублікованого матеріалу. Подальший розвиток моделі за рахунок врахування таких елементів, як автор, назва наукового видання, ключові слова, може зробити результати пошуку більш інформативними.

Сьогодні розроблена система може виступати допоміжним інструментом в оцінці результативності досліджень, порівняльному аналізі та прийнятті рішень щодо надання підтримки науковим проектам для розвитку за результатами дослідження.

Список літератури:

1. Sorokina D. Plagiarism Detection in arXiv. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4053155/>.
2. Warner S. Open Archives Initiative protocol development and implementation at arXiv. URL: <https://arxiv.org/abs/cs/0101027>.
3. Юрченко О.В. Дефініція концепту в сучасних лінгвістичних дослідженнях. URL: http://web.znu.edu.ua/herald/issues/2008/fil_2008_1_2/2008-26-06/yurch.pdf.
4. Андрущенко В.Б. Побудова дерева предметних областей для заданого поняття на базі ресурсу препринтів ArXiv. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу», 24–25 жовтня 2017 р.; Національний авіаційний університет. Київ: НАУ, 2017. С. 20.

НОВЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОИСКА, ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ РЕСУРСА ARXIV

Статья посвящена новым технологиям работы с ресурсом открытого доступа – архивом препринтов arXiv. За счет представления данных, которые содержит ресурс в виде модели «Концепт – система научных направлений», разработан и представлен алгоритм работы с ресурсом и выделены новые массивы информации, которые были сформированы с применением методов text mining к результатам поиска на ресурсе по заданному концепту. В статье показаны результаты апробации алгоритма, их визуализация в среде Gephi и предложены подходы к интерпретации полученных данных. Также были представлены направления развития реализованной задачи.

Ключевые слова: архив препринтов, концепт, научное направление, публикация, граф.

NEW INFORMATION TECHNOLOGIES FOR ARXIV DATA SEARCH, PROCESSING AND ANALYSIS

Paper is dedicated to representing of new technologies for arXiv data search, processing and analysis. By presenting data of archive as a model “Concept – System of research fields” there was developed and realized the algorithm of arXiv data processing and there were obtained new arrays of information formed by application of text mining methods to the search results for the concept. The results of algorithm testing results, visualization in Gephi are depicted in paper and also there suggested approaches to obtained data interpretation and ways to develop the task.

Key words: preprints archive, concept, research field, publication, graph.

UDC 621.039.548

Biryak V.V.

Odessa National Polytechnic University

Boyko O.V.

Odessa National Polytechnic University

Tarakhtii O.S.

Odessa National Polytechnic University

AN AUTOMATED SYSTEM FOR CONTROL OF VVER-1000 FUEL PROPERTIES AT THE EXPENSE OF REACTOR POWER OPTIMIZATION

Described is the use of WWER-1000 type reactor fuel rod claddings' resource estimating method, taking into account the creeping as the main process of shell damage accumulation; this method being applied when creating an automated nuclear fuel properties control system to optimize the reactor loading regime. Revealed is the necessity of shell damage change simulation for the correct calculation of fuel rod envelopes' stresses and deformations evolution, taking into account the complete history of reactor loading. Elaborated is the scheme of automated system for the nuclear fuel properties control by optimizing the reactor loading mode, with a detailed consideration of the suggested control system elements.

Key words: *automated control system, nuclear fuel properties, WWER-1000 reactor, power optimization, CTEV method.*

Introduction. According to forecasts of electricity production in Ukraine, in this century coming decades, the share of electricity generated at nuclear power plants will reach about 50% of the total power generation, the WWER type reactors will remain the basic equipment of nuclear energy industry. Since there takes place a transition to reactors specific with much more severe fuel elements operating conditions as compared to WWER-1000 type ones, and of high likeliness is that all or some of the reactors in Ukraine will be put into maneuver operation, that imposes the need to increase the reactor plants (RP) safety with simultaneous increase in their economical parameters. However, increasing the operational efficiency of the reactor plant due to the increased nuclear fuel burn up depth leads to a more intensive fuel elements load and an increased risk of their shells depressurization, which leads not only to a decrease in reliability and safety of reactor operation, but also to a decrease in profitability [2].

The development of an automated soft-and hardware system for fuel rods properties control of at the stage of WWER-1000 reactor equipped power plant operation, taking into account the safety and fuel

efficiency balance of, will expand the boundaries and increase the operational efficiency of the reactor plant, while improving its safety.

Materials and methods used. The following methods were used in this work: CTEV method for calculating the damage to the fuel cladding; simulation of changes in the fuel cladding damage, depending on the reactor operating parameters; computer modeling; methods of accounting the fuel rod cladding damage parameter in the criterion of efficiency of fuel elements properties management; methods of controlling the fuel elements properties due to the reactor power optimization.

The aim. This work aim is to develop the theoretical foundations for the WWER-1000 reactor nuclear fuel properties control automated system by optimizing the reactor power, while operating the reactor fuel elements, taking into account damage to the shells accumulated under normal conditions, and to increase the fuel rods economic efficiency by controlling their properties, safety requirements following.

CTEV method of calculating the fuel cladding damage. To assess the shell integrity under normal operating conditions, including the variable loads

regime, necessary is to take into account its loading entire history, since the development of the stress-strain state in the shell strongly depends on the sequence of loading parameters. When using the creep theory energy variant (CTEV) to account for creep as the main mechanism for fuel cladding depressurizing under normal operating conditions, the EVTP criterion for the enveloping shell depressurization [1]:

$$\omega(\tau) = A(\tau) / A_0 = 1; \quad A(\tau) = \int_0^\tau \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot d\tau, \quad (1),$$

where $\omega(\tau)$ – is the shell damage parameter;

$A(\tau)$, A_0 – is the specific energy of scattering at time τ and when the shell is destroyed (J/m^3), respectively;

$\sigma_e(\tau)$, $\dot{p}_e(\tau)$ – are equivalent stress (Pa) and the rate of equivalent creep deformation (c^{-1}), respectively.

The A_0 limiting component magnitude in the criterion (1) does not depend on the sequence of the fuel element exploitation factors sets and is determined only by the shell material properties.

Modeling changes in the fuel cladding damage.

According to the CTEV method model for fuel element properties changing, the development of fuel element deformations is determined using finite element method (FEM), and the $\omega(\tau)$ accumulation is found based on EVTP, which ensures:

- consideration to the effect of gap δ changing between the shell and fuel pellet, and the effect of oxide layer thickness on the shell outer surface, for the shell thermo mechanical condition;

- consideration of creep as the main physical accumulation process under WWER operation normal conditions;

- the bounding component in the seal leakage criterion independence from the shell operating conditions, that eliminates the problem of inconsistency between the shell leakage criterion limiting components conditions obtained and the shell actual operating conditions;

- taking into account the fuel element operating conditions sets actual sequence effect onto $\omega(\tau)$.

The model for calculating the fuel element energy release distribution on the basis of a two-group diffusion approximation, uses the following initial data: fuel element structural parameters: WWER-1000 mode parameters; reactor N power variation program characteristics; coordinates of the control system location. Output data are the values of $\langle q_{l,i,j} \rangle$ the average linear power in the conditionally separated axial FA layers (i) located in Safety elements/AKZ cells (j).

The model for calculating the distributions of temperature, stress, and deformation in a fuel ele-

ment according to the FEM uses as input data: $\langle q_{l,i,j} \rangle$ values; fuel rod design parameters; WWER-1000 mode parameters; characteristics of program for changing N. The output data are: temperature, stress and strain in the fuel rod axial segments (AS) (one AS length being assumed equal to the length of two axial layers).

The $\omega(\tau)$ computation model uses voltages and deformations in fuel cladding AS as input data, and the output data are $A(\tau)$ and $\omega(\tau)$ values in the shell AS. At the time step $\Delta\tau_{n+1}$ the shell creep equivalent deformation p_e is defined as

$$p_{e,n+1} = p_{e,n} + \Delta\tau_{n+1} \cdot \dot{p}_e(\tau). \quad (2)$$

To calculate $p_e(\tau)$ and $\sigma_e(\tau)$ iterations between the calculation of temperature and temperature-dependent values, we perform calculation of the gap between the fuel pellet and the envelope δ to achieve convergence at the end of each time step.

Computer modeling. When choosing the Femaxi software [3], the computational analysis of the development of WWER-1000 reactor fuel element cladding stresses and deformations took into account such important advantages of this software tool as:

- concurrent solution of the heat conduction and mechanical deformation equations;

- ability to determine the fuel rod reaction to the combined effect of linear power changes in the fuel element, heat carrier parameters, other factors over the entire range of normal operating conditions of WWER-1000 reactor, up to fuel burn up depths exceeding 50 MW • day / kg-U.

According to this tool-implemented design model, the fuel element is conditionally divided into 10 AS, for center point of each AS its maximum linear power $q_{l,max}$ AS is set. The linear power at other AS points is calculated by extrapolating the values specified for the central points. The temperature distribution in the fuel element is predicted for a one-dimensional radial geometry based on internal heat dissipation, changes in the pellet and the gap thermal conductivity, heat exchange between the fuel element surface and the coolant. The fuel temperature calculation is performed with a difference between numerical and analytical solutions never exceeding 0,1%. Both elastic and plastic deformation, mechanical interaction between fuel and envelope (MIFE), as well as creep deformation are calculated. The gaseous fission products release, their diffusion is calculated according to the adopted model with the calculus of formed bubbles reaching the grain boundaries and the fuel element internal space, also calculated is the growth of fuel element internal pressure. The time step is given automatically from the condition of the

numerical solution stability and convergence in calculating creep for all AS [3].

According to the ETCP method, the $\omega(\tau)$ calculation requires to find $A(\tau)$ for the conditions of a shell long-term variable temperature-force loading under radiation conditions. Therefore, the decisive factor to choose the Femaxi tool was that this software allows correctly calculate with FEM for a WWER-1000 reactor mode parameters given sequence, the shell's σ_e and \dot{p}_e taking into account the radiation effects. The rate of equivalent creep deformation was presented in the following form [3]:

$$\dot{p}_e = f(\sigma_e, \bar{\varepsilon}^H, T, \Phi, F), \quad (3)$$

where $\bar{\varepsilon}^H$ – is the dimensionless hardening parameter; T is the temperature, K; Φ – fast neutron flux density, $1 / m^2 s$; F – is the division rate, $1 / m^3 s$.

Accounting for shells damage in the criterion for the fuel elements properties control effectiveness.

For the application of the EVTP method, taking into account simultaneously the fuel rod operation safety and economy limiting conditions, the criterial model (CM) of fuel element properties management efficiency is used on the following principles basis [1]:

– The purpose of WWER-1000 fuel elements properties controlling is to increase the fuel elements normal operation efficiency due to joint account of the fuel element claddings $\omega(\tau)$ damage and the reactor operational efficiency economic and technological indicators;

– the fuel rod properties control is carried out on the basis of the requirements to fuel elements and core properties (ACZ), the controlled parameters determination and determinative factors;

– the control effectiveness criterion structure is the same for all control tasks, but the criterion components are not invariant;

– determined are the controlled parameters, such as:

1) Parameter of fuel rod cladding damage as a factor describing the nuclear fuel (nuclear fuel) operation safety;

2) Nuclear fuel burn up depth as a factor that its operation economy.

As a variable factor determining the fuel rod cladding damage parameter and the nuclear fuel burn up depth the nuclear reactor loading regime is used.

Results. In fig. 1 shown is a scheme for nuclear fuel properties control by optimizing the nuclear power plant loading regime. Let's consider in more detail the circuit elements controlling properties of nuclear fuel reactor type VVER-1000 due to reactor power optimization.

– The active core zone of a nuclear reactor (ACZ) is an area where nuclear fuel assemblies (FA) are

located, where a controlled chain reaction of heavy nucleus division takes place. During the chain reaction in ACZ the energy evolution process takes place. The active zone includes: nuclear fuel; retarder; heat carrier, which passes outside the reactor heat generated at ACZ; Reactor Control and Protection System (RCPS). Externally, the active area is surrounded by a neutron reflector. The reflector partially returns to the ACZ neutrons that have fled out of the active zone, therefore the reflector increases the efficiency of nuclear reactor fuel use.

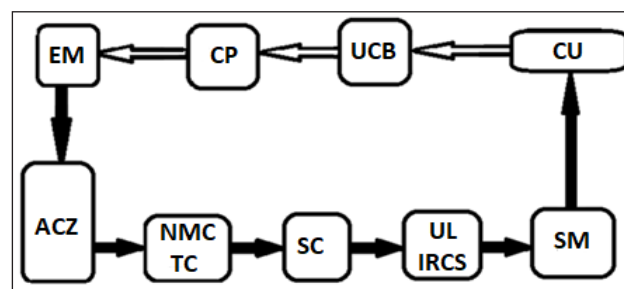


Fig. 1. Circuit controlling WWER-1000 reactor type nuclear fuel properties due to optimization of reactor power: ACZ – active zone; NMC – neutron measuring channel; TC – thermocouple; SC – switch cabinet, lower level; UL IRCS – upper level of the intra-reactor control system; SM – simulation model; CU – comparison unit; UCB – unit control board; CP – control panel; EM – executive mechanism.

– Neutron measuring channel (NMC) is designed to measure neutron power and reactivity of the reactor based on the signals received from neutron flux sensors located in the reactor plant. The NMC structure includes: neutron flux sensors for neutrons registration in the reactor and their transformation into electrical signals; signaling sensors rated sets; units for signals conversion into digital code; software and technical modules that perform information processing and calculations to get output signals corresponding to the reactor neutron power measured values, period of power change and reactivity.

– Thermocouple (TP) is a sensitive element of a thermoelectric converter in formed by two isolated conductors from heterogeneous materials connected at one end, the principle is based on the thermoelectric effect use for temperature measuring. In the proposed system, used are thermocouples of TXA type (chromel – aluminilum), which temperature range is from -50 to 1300°C.

– Switch cabinets (SC) do serve to convert physical quantities (obtained from the above sensors) into an electrical signal further fed to the internal reactor control system for analysis. The SC do place: 288 pieces of resistors to receive discrete signals of 220 V voltage and information output voltage 24 V;

terminal blocks (72 pieces each containing 16 terminals); two fan blocks.

– Upper level intra-reactor control system (UL IRCS) provides information on the reactor active zone parameters and characteristics necessary to ensure the ACZ design technological operation. Its main task is to restore the power output field in the ACZ volume to ensure the nuclear fuel safe operation. The role of IRCS in the developed system is to ensure reactor's safe and economical operation in the energy range by collecting, processing and displaying on the operator's monitors information on the ACZ state and the parameters of the first contour.

– Simulation model (MI) is implemented with a software package designed to simulate changes in the nuclear fuel reactor properties over time. The generated simulation model is designed to simulate the nuclear fuel operation at given parameters and to calculate the FA shells damage parameter taking into account their full history of loading. The simulation model includes two program environments (PE):

1) Software "Femaxi" – used to calculate the shells damage parameter.

2) Software "Reactor Simulator" (RS) – designed to create a behavior model for the reactor with given input data [4]. To note is that when using this regulation system, all necessary input data for FEMAXI are read by sensors directly from the reactor core. Therefore, the RS PE will only perform an auxiliary function.

– Comparison unit (CU), designed to compare the shells damage parameter value with its maximum allowable value (set before the reactor introduction to operation to establish limit, involving deactivation when excessive operation mode of reactor can cause an emergency situation) obtained from the simulation model. The conclusion on the need to change the load regime is made according to these values comparison result. Also this unit, as a result of solving the optimization problem, is used to calculate a new level of reactor power.

– Unit control board (UCB), located in a special room and intended for centralized automated control of technological processes, implemented by operational personnel and automation.

General information about the active zone status in the form of parameters and control recommendations is presented on UCB monitors. It serves for reactor launching, bringing to rated power, turbine launching, to synchronize the generator with power system, unit control in the normal and emergency modes of operation, as well as the planned and emergency stop of the reactor and turbine;

– The control panel (PC) making part of the UCB is intended to control and monitor the change in reactor power, respective devices operation and respective processes run. The control panel consists of an information collection unit, a control unit, a signal unit, etc.

– The executive mechanism (EM) in the proposed control system is embodied with a solenoid (electromagnetic) valve. The level of its opening depends on the results of comparing the shells damage parameter values at FA and the calculation of reactor power new level that are carried out in the comparison unit CU. Degree of valve opening affects the amount of boron concentrate added to the nutritional water of the ACZ. Thus, the control of reactor's reactivity by the method of changing the boric acid concentration in the first circuit coolant is chosen. This is reasoned because the level boric acid of concentration in the coolant significantly affects the reactivity due to the corresponding reactivity coefficient [5]. Concentration of boric acid in the coolant is varied either by the coolant addition to the reactor circuit with boric acid solution introduced, either by adding pure water to the reactor circuit. Although this method of reactor power control is rather slow compared with the method of power regulation by the IRC, however, at such system for nuclear fuel properties control, there is no need for a rapid change in the reactor power level.

Conclusions. It is advisable to develop and implement for the NPP Energoatom NAEC the WWER-1000 reactors nuclear fuel properties automated control system which optimizes the reactor power level. In this automated control system, it is necessary to use a criterion for fuel elements' properties control effectiveness, including damage to fuel rod shells under normal operating conditions.

Such an innovative nuclear fuel properties control system can be created on the basis of the method for fuel cladding shells operating life estimating under WWER-1000 reactor normal operating conditions taking into account creep as the main process of deformation damage accumulation to shells. In a promising nuclear fuel properties automated control system operated through optimizing the reactor power level, in order to correctly model the fuel cladding envelopes stresses and deformations development necessary is to take into account the change in shell damage depending on the full history of the nuclear fuel loading, determined by the reactor parameters change throughout the fuel campaign.

References:

1. Pelykh S.N. Grounds of VVER fuel element behavior control. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. 160 p. (Rus).
2. Review of fuel failures in water-cooled reactors. IAEA Nuclear Energy. Series № NF-T-2.1. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2010. 191 p.
3. Сузуки М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения. Одесса: Астропринт, 2010. 248 с.
4. Филимонов П.Е. Программа «Имитатор реактора» для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000. Атомная энергия. 1998. Т. 84. № 6. С. 560–563.
5. Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байбаков В.Д., Алхутов М.С. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 512 с.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЯМИ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА ВВЕР-1000 ЗА РАХУНОК ОПТИМІЗАЦІЇ ПОТУЖНОСТІ РЕАКТОРА

Описано використання методу оцінки ресурсу оболонок твєлів реактора типу ВВЕР-1000, що враховує повзучість як основний процес накопичення пошкодженості оболонок, у створенні автоматизованої системи керування властивостями ядерного палива за рахунок оптимізації режиму навантаження реактора. Для коректного розрахунку еволюції напруг і деформацій в оболонках твєлів показана необхідність моделювання зміни пошкодження оболонок з урахуванням повної історії навантаження реактора. Розроблено схему автоматизованої системи керування властивостями ядерного палива за рахунок оптимізації режиму навантаження реактора. Детально розглянуті елементи запропонованої системи керування.

Ключові слова: автоматизована система керування, властивості ядерного палива, реактор ВВЕР-1000, оптимізація потужності, ЕВТП метод.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ВВЭР-1000 ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ МОЩНОСТИ РЕАКТОРА

Описано использование метода оценки ресурса оболочек твэлов реактора типа ВВЭР-1000, учитывающий ползучесть как основной процесс накопления поврежденности оболочек, при создании автоматизированной системы управления свойствами ядерного топлива за счет оптимизации режима нагрузки реактора. Для корректного расчета эволюции напряжений и деформаций в оболочках твэлов показана необходимость моделирования изменения повреждения оболочек с учетом полной истории нагрузки реактора. Разработана схема автоматизированной системы управления свойствами ядерного топлива за счет оптимизации режима нагрузки реактора. Подробно рассмотрены элементы предложенной системы управления.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, свойства ядерного топлива, реактор ВВЭР-1000, оптимизация мощности, ЭВТП метод.

УДК 681.51

Бланарь П.Г.

Одесский национальный политехнический университет

Бундюк А.Н.

Одесский национальный политехнический университет

Улицкая Е.О.

Одесский национальный политехнический университет

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ И АНАЛИЗ ДИНАМИКИ КОНТУРА ГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

Показана актуальность применения когенерационных энергетических установок малой мощности как альтернативных источников снабжения теплом, электричеством и горячего водоснабжения. В статье предложена математическая модель динамики участка утилизации выхлопных газов и участка теплопередачи в пользовательскую сеть когенерационной энергетической установки с тепловым двигателем в виде двигателя внутреннего сгорания. Эти участки образуют тепловые аккумуляторы энергии, к которым относятся газо-водяной теплообменник теплоутилизатора, водо-водяной подогреватель отопительной сети и водо-водяной подогреватель сети горячего водоснабжения. Представленная нелинейная математическая модель позволяет исследовать динамические свойства участка потребителей тепла, производимой когенерационной установкой в широком диапазоне нагрузок. Модель учитывает влияние изменения температуры наружного воздуха на формирование задания температуры воды теплоносителя, подаваемого в сеть потребителей отопления.

Ключевые слова: когенерационная установка, автоматизация, нелинейная модель, газо-водяной теплообменник, водо-водяной теплообменник.

Постановка проблемы. Энергонезависимость и энергоэффективность как стратегическое направление построения и реконструкции производственных предприятий обусловило рост применения когенерационных энергетических установок (далее – КЭУ). Совместное производство тепловой и электрической энергии практикуется отечественными энергетиками уже давно, поскольку позволяет значительно увеличить эффективность использования топлива. В когенерационных установках для выработки тепловой энергии используются выхлопные газы двигателей различного строения, которые через теплообменник отдают энергию в магистраль. Тепло, обычно рассеиваемое в атмосферу, в когенерационных установках утилизируется для полезного использования в бытовых или промышленных процессах.

Постановка задания. Целью статьи является разработка математического описания и анализ

процессов передачи тепловой энергии потребителям тепла и горячей воды, производимой КЭУ с двигателем внутреннего сгорания (далее – ДВС) в качестве теплового двигателя.

Анализ последних исследований и публикаций. В когенерационных установках для выработки тепловой энергии используются выхлопные газы двигателей различного строения, которые через теплообменник отдают энергию в магистраль. В зарубежной практике подобные системы имеют название CHP-plant (Combined Heat and Power plant – завод по совместному производству тепла и электроэнергии). Исследованию и моделированию таких систем уделено внимания во многих научных работах. Расчеты технико-экономических показателей КЭУ подтверждают их высокую экономичность [1]. Для значительного количества потребителей энергетической продукции наиболее привлекательными являются КЭУ с тепловыми двигателями в виде ДВС. Модели-

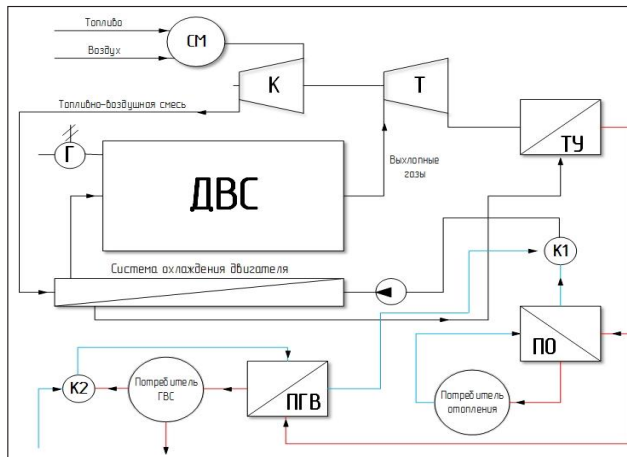


Рис. 1. Структурная схема когенерационной энергетической установки

- СМ – смеситель;
 К – компрессор;
 Т – турбина;
 ДВС – двигатель внутреннего сгорания;
 Г – генератор;
 ТУ – теплоутилизатор;
 ПО – подогреватель отопления;
 ПГВ – подогреватель горячего водоснабжения;
 ГВС – горячее водоснабжение;
 К1, К2 – коллекторы.

рование динамики топливно-воздушного тракта КЭУ с ДВС проведено в работе [2]. В статье [3] приведена модель когенерационной установки, полученная без составления уравнений, с помощью пакета ThermosysPro, входящего в среду Dymola (Dynamic Modeling Laboratory), являющегося инструментом для моделирования систем. Моделированию когенерационной установки на алгоритмическом языке Visual Basic с использованием технологий объектно-ориентированного программирования посвящена работа [4], сделаны выводы о необходимости согласования графиков электрической и тепловой нагрузок когенерационной установки с соответствующими нагрузками потребителя. В статье [5] доказана важность рассмотрения процесса теплообмена при моделировании КЭУ, используемых для централизованного теплоснабжения, особенно когда они работают в режимах, значительно отличающихся от номинальных. Однако динамика контура генерации тепловой энергии КЭУ изучена не в полном объеме. Таким образом, разработка математической модели теплового контура (далее – ТК) и исследование его динамических свойств является актуальным вопросом.

Изложение основного материала исследования. Главным фактором, заставляющим переходить на альтернативные средства снабжения теплом и электроэнергией, является изношен-

ность тепло- и электросетей, а также низкое качество электроэнергии. Этой альтернативой стали когенерационные установки малой мощности, так называемые мини-ТЭЦ, способные обеспечить тепловой и электрической энергией отдельные здания или предприятия [6].

Электрическая полезная энергия возникает в результате процесса сгорания топлива в ДВС и посредством его вращательного движения преобразуется с помощью синхронного генератора в электрический ток. Тепловая энергия, полученная в результате процесса сгорания этого же топлива в ДВС, представляется как тепло выхлопных газов, блока двигателя и смазочной системы двигателя.

Экономное использование первичной энергии топлива достигается благодаря рекуперации тепла от выхлопных газов, охлаждающей жидкости двигателя, смазки двигателя.

Общий КПД когенерационной установки при этом определяется из суммы электрической и тепловой полезной энергии.

Тепло, получаемое от выхлопных газов двигателя, может быть использовано для генерации пара, необходимого в текстильной, пищевой, бумажной и химической промышленности. Тепло, получаемое от охлаждения смазочного масла двигателя, его водяной рубашки и воздушного охлаждения, может быть использовано для подогрева воды, например, в сети централизованного теплоснабжения и горячего водоснабжения. Общая структурная схема рассматриваемой КЭУ представлена на рис. 1.

Выхлопные газы после ДВС направляются через систему турбонаддува в теплоутилизатор, где, являясь греющей средой, передают свою тепловую энергию теплоносителю – нагреваемой воде для систем отопления и горячего водоснабжения.

В статье ставится задача разработки математического описания процессов передачи тепловой энергии потребителям тепла и горячей воды, производимой КЭУ с ДВС.

Для большей наглядности на рис. 2 изображены основные аппараты и выделены технологические параметры, определяющие динамику рассматриваемой системы.

К внешним возмущающим параметрам относятся:

- температура и расход выхлопных газов на входе в ТУ (t_1 и G_1);
- температура обогреваемой воды на входе в теплоутилизатор (t_3);
- температура обогреваемой среды на входе в водо-водяной подогреватель отопительной сети (t_4);

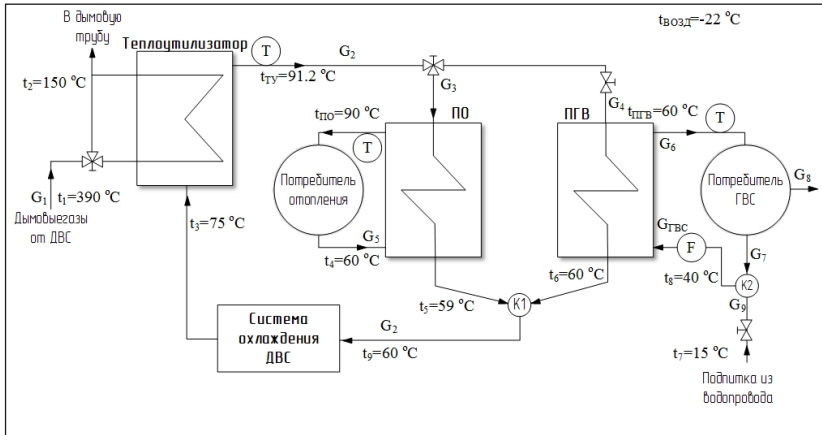


Рис. 2. Структурная схема рассматриваемого участка

– температура обогреваемой среды на входе в водо-водяной подогреватель горячего водоснабжения (t_8).

К регулируемым параметрам системы относятся:

– температура обогреваемой воды на выходе теплоутилизатора (t_{TY});

– температура обогреваемой среды на выходе водо-водяного подогревателя отопительной сети ($t_{ПО}$);

– температура обогреваемой среды на выходе водо-водяного подогревателя горячего водоснабжения ($t_{ПГВ}$);

– расход обогреваемой среды на входе в водо-водяной подогреватель горячего водоснабжения после коллектора K2 ($G_{ГВС}$).

В рассматриваемом участке выделены следующие каналы регулирования:

– расход дымовых газов ($G_1 \rightarrow t_{TY}$);

– расход воды для подогревателя отопления ($G_3 \rightarrow t_{ПО}$);

– расход воды для системы ГВС ($G_4 \rightarrow t_{ПГВ}$);

– расход воды для подпитки системы ГВС ($G_9 \rightarrow G_{ГВС}$).

Система нелинейных уравнений, описывающих динамику контура генерации тепловой энергии когенерационной установки, имеет вид:

$$\frac{dt_{TY}}{d\tau} = \frac{t_3 \cdot Cp_3 \cdot G_2 + G_1 \cdot (t_1 \cdot Cp_1 - t_2 \cdot Cp_2) - t_{TY} \cdot Cp_{TY} \cdot G_2}{m_{TY} \cdot Cp_{TY}^{sp}} \quad (1)$$

$$\frac{dt_{ПО}}{d\tau} = \frac{t_4 \cdot Cp_4 \cdot G_5 + G_3 \cdot (t_{TY} \cdot Cp_{TY} - t_5 \cdot Cp_5) - t_{ПО} \cdot Cp_{ПО} \cdot G_5}{m_{ПО} \cdot Cp_{ПО}^{sp}} \quad (2)$$

$$\frac{dt_{ПГВ}}{d\tau} = \frac{\frac{t_{ПГВ} \cdot G_7 + t_7 \cdot G_9}{G_7 + G_9} \cdot Cp_8 \cdot G_{ГВС} + G_4 \cdot (t_{TY} \cdot Cp_{TY} - t_6 \cdot Cp_6) - t_{ПГВ} \cdot Cp_{ПГВ} \cdot G_6}{m_{ПГВ} \cdot Cp_{ПГВ}^{sp}} \quad (3)$$

Массы рабочих веществ, находящихся в теплообменных аппаратах (m_{TY} , $m_{ПО}$, $m_{ПГВ}$), определяются в результате конструктивного расчета тепло-

обменных аппаратов, выполненных по методике [7].

Расход воды $G_{ГВС}$ после коллектора K2 определяется как сумма расходов воды подпитки (G_9) и неиспользованной воды из сети горячего водоснабжения (G_7). Расход воды для нужд потребителей обозначен как G_8 .

Требуемое значение температуры воды, подаваемой в сеть потребителей отопления в зависимости от наружной температуры воздуха, определяется по зависимости (4), а ее графическое представление имеет вид (рис. 3):

$$t_{ПО} = -0.0066 \cdot t_{ВОЗД}^2 - 1.6 \cdot t_{ВОЗД} + 58 \quad (4)$$

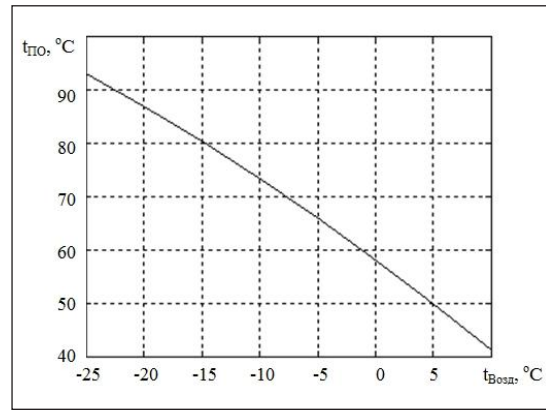


Рис. 3. Температурный график для системы отопления

Теплоемкость (Cp_{ii} , кДж/(кг·°C)) и плотность воды (ρ_{ii} , кг/м³) как основного теплоносителя системы горячего водоснабжения и отопления, в зависимости от температуры t_i , определяется выражениями вида (5–6):

$$Cp_{ii} = -1.7 \cdot 10^{-6} \cdot t_i^3 + 1.6 \cdot 10^{-4} \cdot t_i^2 - 6.3 \cdot 10^{-3} \cdot t_i + 4.26 \quad (5)$$

$$\rho_{ii} = -1.45 \cdot 10^{-6} \cdot t_i^4 + 4.75 \cdot 10^{-4} \cdot t_i^3 - 8.3 \cdot 10^{-2} \cdot$$

$$\cdot t_i^2 + 0.87 \cdot t_i + 999 \quad (6)$$

Таким образом, система дифференциальных уравнений (1) – (3) совместно с алгебраическими уравнениями (4) – (6) составляют математическое описание динамики теплообменного оборудования, работающего в составе теплового контура когенерационной установки. В результате решения системы уравнений методом Эйлера с шагом дискретности 1 были получены кривые разгона ТК при различных возмущениях. Стоит отметить, что приведенная модель позволяет исследовать

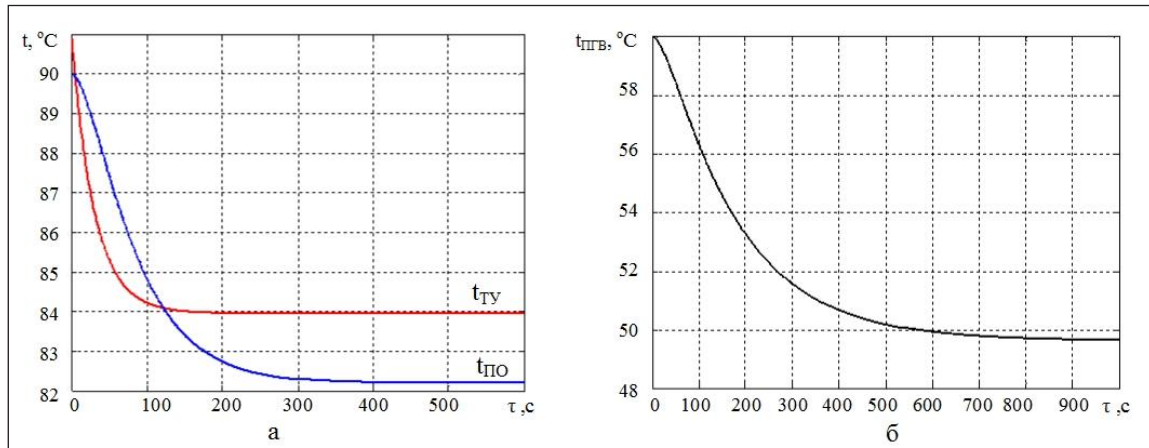


Рис. 4. Кривые разгона ТК по температуре теплоносителя на выходе теплоутилизатора и подогревателя отопления (а), а также на выходе подогревателя сети ГВС (б) при изменении расхода дымовых газов

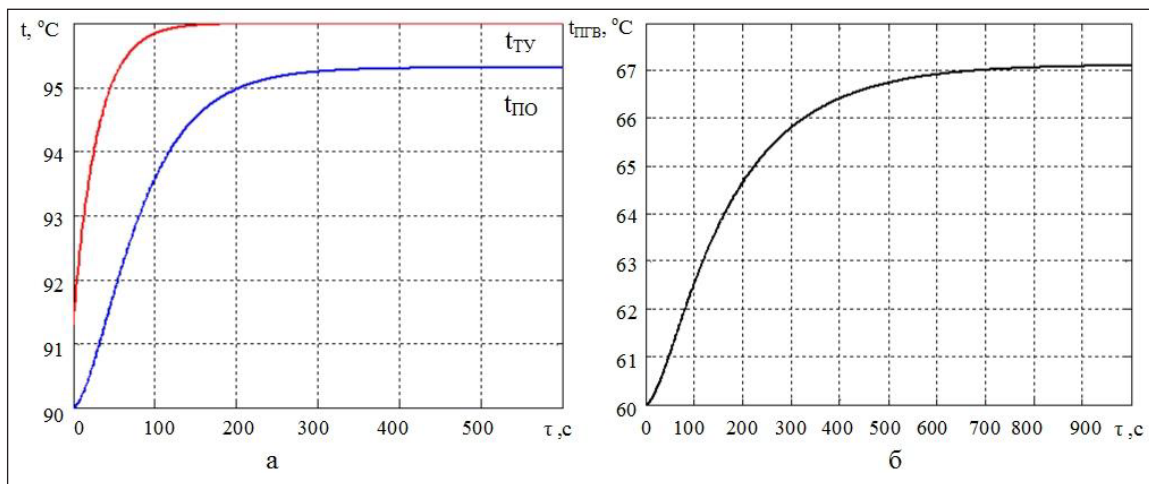


Рис. 5. Кривые разгона ТК по температуре теплоносителя на выходе теплоутилизатора и подогревателя отопления (а), а также на выходе подогревателя сети ГВС (б), при изменении температуры теплоносителя на входе теплоутилизатора

динамику ТК при существенных отклонениях параметров от их номинальных значений.

На рис. 4 приведены результаты моделирования ТК при возмущении по управляющему воздействию изменения расхода дымовых газов $\Delta G_1 = -40\%$, производимых при сжигании топлива в двигателе внутреннего сгорания КЭУ. При этом температура нагреваемой воды после теплоутилизатора снизилась на 5°C , после подогревателя отопления на $7,8^\circ\text{C}$, а после ПГВ более чем на 10°C .

Изменение температуры теплоносителя на входе в теплоутилизатор также влияет на его выходные параметры. Так, на рис. 5 приведены кривые разгона выделенных параметров ТК при увеличении на 5°C температуры обогреваемой воды на входе в теплоутилизатор (t_3), что приводит к увеличению температуры на выходе тепло-

утилизатора на 5°C , в сети отопления на $5,3^\circ\text{C}$ и в сети ГВС на 7°C .

Влияние расхода воды, потребляемой из сети ГВС и температуры подпиточной воды, подаваемой в коллектор К2 для поддержания номинального расхода горячей воды, представлено на рис. 6а и 6б соответственно. Увеличение потребления горячей воды в сети ГВС (ΔG_8) на 10% приводит к понижению ее температуры на $5,7^\circ\text{C}$, а увеличение температуры подпиточной воды (Δt_7) на 5°C влечет рост температуры воды, подаваемой в сеть ГВС примерно на 5°C .

Исследования возмущающих воздействий в сети ГВС показали, что к большему отклонению температуры воды, подаваемой в сеть, приводит уменьшение, нежели аналогичное увеличение ее потребления (рис. 7).

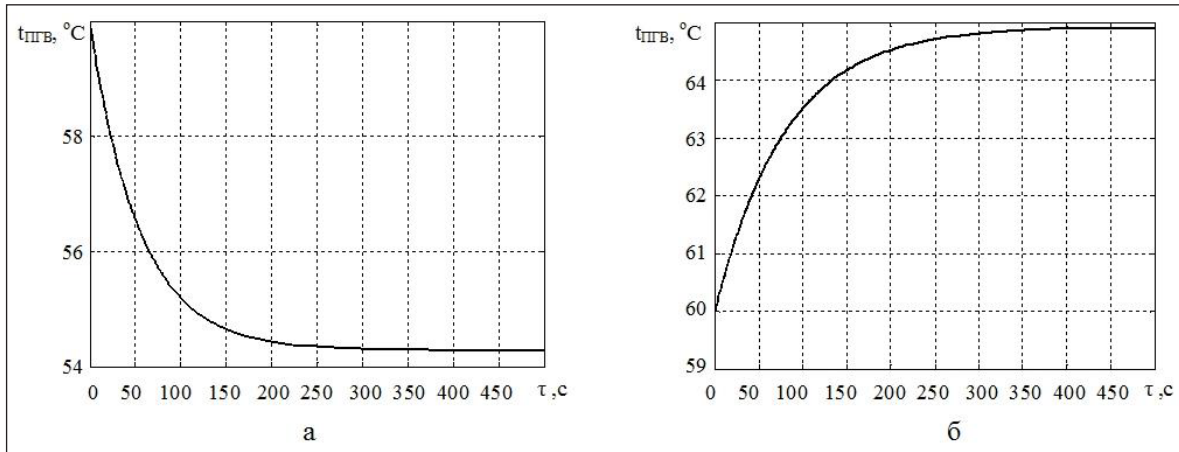


Рис. 6. Кривые разгона ТК по температуре теплоносителя на выходе подогревателя сети ГВС при изменении расхода потребляемой воды сети ГВС (а) и температуры подпиточной воды (б)

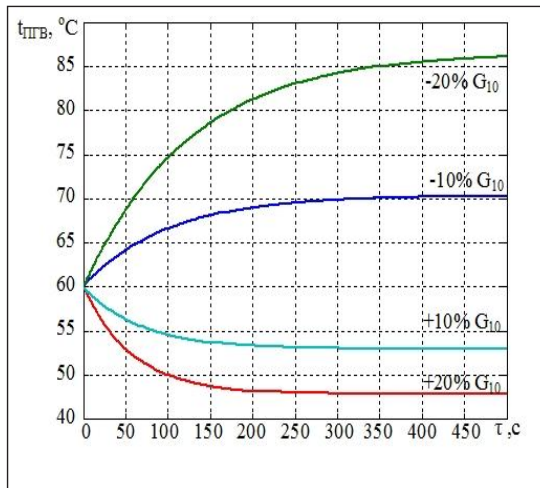


Рис. 7. Кривые разгона ТК по температуре теплоносителя на выходе подогревателя сети ГВС при различных изменениях расхода потребляемой воды сети ГВС

Эта нелинейность в реакции ТК на указанное возмущение является характерной чертой применения нелинейных математических моделей при описании динамических свойств объектов автоматизации. В частности, различия в реакции на возмущение по расходу воды потребляемой в сети ГВС на температуру $t_{ПГВ}$ обуславливается видом нелинейного дифференциального уравнения (3).

На рис. 8 отражена реакция теплового контура на возмущение по управляющему воздействию $\Delta G_3 = -10\%$ от номинального расхода воды на подогреватель отопления, что, в свою очередь, увеличивает расход воды в сеть ПГВ на 20% ($\Delta G_4 = +20\%$). Указанные возмущения уменьшают температуру теплоносителя в сети ПО на 3,5°C и увеличивают температуру теплоносителя в сети ПГВ почти на 8°C.

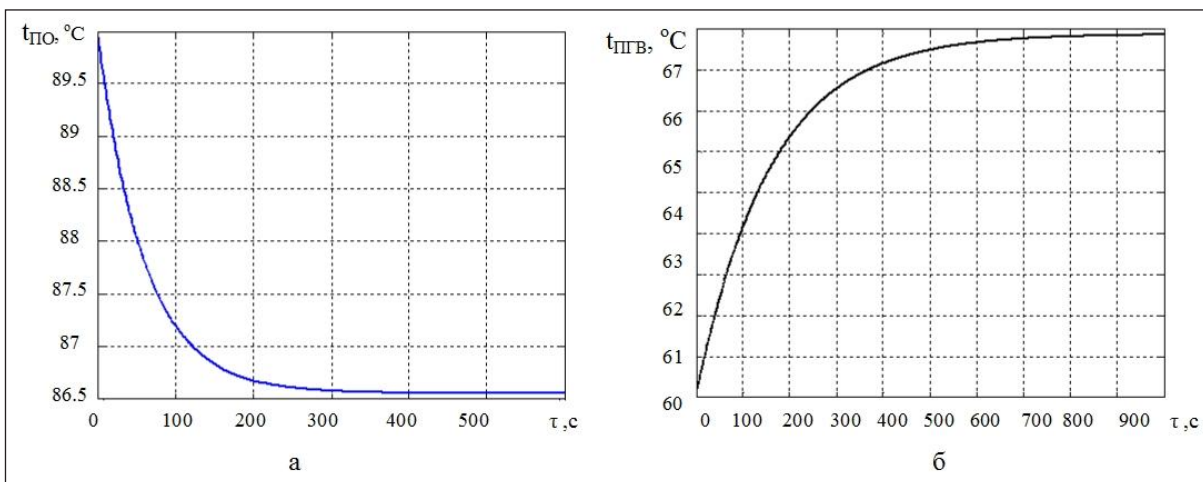


Рис. 8. Кривые разгона ТК по температуре теплоносителя на выходе подогревателя отопления (а) и на выходе подогревателя сети ГВС (б), при уменьшении расхода греющей воды ПО

Выводы. Разработана математическая модель теплового контура КЭУ, которая позволяет провести анализ его динамических свойств при возмущающих и регулирующих воздействиях. В результате проведенного анализа влияния внешних возмущений определены разгонные кривые

теплового контура КЭУ как объекта регулирования температур: $t_{ТЭ}$, $t_{ПО}$, $t_{ПГВ}$.

Разработанное математическое описание будет использовано для дальнейшего синтеза системы автоматического регулирования тепловых потоков КЭУ.

Список литературы:

1. Бундюк А.М., Улицька О.О. Розробка алгоритму для розрахунку статичної когенераційної енергетичної установки. Холодильна техніка і технологія. 2013. № 3 (143). С. 34–40.
2. Бундюк А.Н., Улицкая Е.О., Ларионова О.С. Моделирование динамики топливно-воздушного тракта когенерационной энергетической установки. Праці Одеського політехнічного університету. 2014. № 2 (44). С. 122–128.
3. Deneux O. Establishment of a Model for a Combined Heat and Power Plant with Thermosys Pro Library. Procedia Computer Science. 2013. № 19. P. 746–753.
4. Мазуренко А.С., Баласанян Г.А., Сычова Е.А. Эффективность регулирования отпуска теплоты когенерационной газотурбинной установкой. Праці Одеського політехнічного університету. 2005. № 6. С. 108–112.
5. Yuanhang D., Chen L., Yong M. Dispatch Model of Combined Heat and Power Plant Considering Heat Transfer. Process IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2017. № 8. P. 1225–1236.
6. Панык В. Когенерация: как это работает. Обзор рынка. Сети и бизнес. 2010. № 4 (53). С. 96–101.
7. Бундюк А.М. Розрахунки конструктивних характеристик теплообмінних апаратів: навч. посіб. Одеса: ОНПУ, 2013. 24 с.

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ Й АНАЛІЗ ДИНАМІКИ КОНТУРА ГЕНЕРАЦІЇ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

Показана актуальність застосування когенераційних енергетичних установок малої потужності як альтернативних джерел постачання теплом, електрикою і гарячого водопостачання. У статті запропоновано математичну модель динаміки ділянки утилізації вихлопних газів і ділянки теплопередачі у призначену для користувача мережу когенераційної енергетичної установки з тепловим двигуном у вигляді двигуна внутрішнього згорання. Ці ділянки утворюють теплові акумулятори енергії, до яких належать газоводяний теплообмінник теплоутилізатора, водо-водяний підігрівач опалювальної мережі та водо-водяний підігрівач мережі гарячого водопостачання. Представлена нелінійна математична модель дозволяє досліджувати динамічні властивості ділянки споживачів тепла, виробленої когенераційною установкою в широкому діапазоні навантажень. Модель враховує вплив зміни температури зовнішнього повітря на формування задавання температури води теплоносія, що подається в мережу споживачів опалення.

Ключові слова: когенераційна установка, автоматизація, нелінійна модель, газо-водяний теплообмінник, водо-водяний теплообмінник.

DESIGN OF THE MATHEMATICAL MODEL AND DYNAMICS ANALYSIS OF COMBINED HEAT AND POWER PLANT THERMAL ENERGY GENERATION CIRCUIT

The relevance of low-power combined heat and power plant (CHP-plant) as alternative heat, electricity and hot water supply source is presented. This paper proposes dynamics mathematical model of exhaust gases utilization area and the heat transfer section into the consumer network CHP-plant with a thermal engine in the form of an internal combustion engine. These sections form thermal energy accumulators, which include a gas-water heat exchanger; a water-and-water heater of the heating network and a water-and-water heater of the hot water supply network. The presented nonlinear mathematical model allows to investigate the dynamic properties of the heat consumers section produced by the cogeneration unit in a wide range of loads. The model takes into account the influence of the change in the outside air temperature in the formation of the water temperature setting of the coolant supplied to the heating consumers network.

Key words: CHP-plant, automation, nonlinear model, gas-water heat exchanger, water-and-water heater.

УДК 004.9

Борейко М.Г.

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова
Національної академії наук України

Будник М.М.

Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова
Національної академії наук України

РОЗРОБКА ПРОГРАМНО-АПАРATНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ФІЗІОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЯХТСМЕНІВ

Розглянуто вимоги до системи моніторингу фізіологічних параметрів людини, а також особливі вимоги до них для використання на яхтах. Запропоновано архітектуру такої мобільної системи та її програмно-апаратну реалізацію. Система здійснює реєстрацію, обробку та накопичення частоти серцевих скорочень, варіабельності ритму серця, рівня фізичної активності та температура тіла. Технічні засоби включають портативний комп'ютер Raspberry Pi 3 Model B і смарт-браслету Garmin Forerunner із функцією Wi-Fi. Описано функції та структуру програмного забезпечення і його API інтерфейс. Сьогодні система проходить тестування під час навколосвітніх гонок яхт Volvo Ocean Race.

Ключові слова: системи моніторингу, архітектура клієнт-сервер, медичні гаджети, яхтсмени, фізіологічні параметри.

Постановка проблеми. Моніторинг основних фізіологічних показників людини (частота серцевих скорочень, варіабельність ритму серця, температура тіла, частота дихання, рівень активності, витрачені калорії та ін.) є дуже важливим для професій, що супроводжуються високим рівнем фізичного або емоційного навантаження. До них належать військові, співробітники поліції, робочі на віддалених зонах, моряки тощо. Сьогодні у серійне виробництво запущено декілька систем віддаленого моніторингу стану солдата (Hertz Systems Hedera, Leidos SMS та ін.). Однак більшість подібних систем передають дані до центрального серверу командування через GSM мережі [1].

З іншого боку, відомо, що в умовах тривалих морських рейсів, особливо океанічних, людина постійно перебуває під дією кліматичних і специфічних суднових факторів, які викликають в організмі різноманітні патологічні зміни. Тому ця проблема також актуальна для медицини праці, з огляду на те, що частина працездатного населення виконує діяльність, пов'язану з перебуванням у морських умовах [2].

За тривалого перебування в морських умовах відбуваються значні адаптаційні зміни в орга-

нізмі людини, в т. ч. у серцево-судинній системі. Це проявляється в стійкому зниженні частоти серцевих скорочень, систолічного і пульсового артеріального тиску за відсутності змін ударного викиду і діастолічного тиску. Фізичне навантаження дозволяє виявити ознаки зниження ефективності серцевої діяльності та скорочувальної активності міокарда [3].

Постановка завдання. Сьогодні недостатньо уваги приділяється засобам моніторингу фізіологічного стану моряків, адже через обмежене покриття зв'язок недоступний чи його якість недостатня. У зв'язку з цим важливим є моніторинг спортсменів, що плавають на далекі дистанції, наприклад, яхтсменів, а саме стан їх рівня стресу, втомлюваності, витрачених калорій та інших факторів для оптимального планування харчування, коригування режимів роботи та відпочинку. Також це актуально для моряків інших професій, які здійснюють тривалі подорожі, у т. ч. в інших кліматичних зонах, в умовах автономного плавання. Це вимагає мобільної системи, яка забезпечувала б збір, обробку та збереження фізіологічних даних членів екіпажу судна.

Завдання – розробити архітектуру, створити програмне забезпечення й апаратно реалізувати

систему для офлайн-моніторингу основних фізіологічних показників яхтсменів, враховуючи особливості середовища на судні. Система має задовольняти такі вимоги:

- підтримувати велику кількість моніторених осіб;
- працювати без наявності мережі;
- зберігати дані та результати їх обробки невідзначений час;
- споживати якомога менше енергії та простору;
- надавати можливість перегляду даних для певних осіб.

Виклад основного матеріалу дослідження.
Апаратна реалізація системи. Найбільш зручним засобом для моніторингу фізіологічних параметрів людини є смарт-браслети, що можуть надавати інформацію про частоту серцебиття, артеріальний тиск, температуру тіла, кількість кроків та ін. [4].

Більшість цих пристроїв має можливість передачі даних через Блютуз (Bluetooth), проте зазначений протокол має істотне обмеження – максимальна кількість пристроїв, під'єднаних до одного сервера, становить 7. Це робить неможливим його використання для моніторингу більш ніж 7 осіб одночасно.

Через це було обрано технологію Wi-Fi, яка не має обмеження за кількістю під'єднаних пристроїв. Крім того, радіус покриття становить близько 100 м (залежно від реалізації точки доступу), чого цілком достатньо для більшості морських суден. Також радіус покриття може бути легко збільшений встановленням додаткових точок доступу. Отже, основною додатковою функцією смарт-браслета з погляду реалізації поставленого завдання є наявність вбудованих засобів Wi-Fi. Таку функцію, наприклад, має смарт-браслет Garmin Forerunner, який і було обрано для цієї системи.

Для створення сервера використано портативний комп'ютер RaspberryPi 3 Model B, вартість якого складає 35\$. Його розмір трохи більший за банківську карту, а енергоспоживання складає до 15 Вт за цілком достатньої продуктивності [5]. Також ця модель має вбудований Wi-Fi модуль, що може працювати в режимі точки доступу, що дозволяє відмовитися від додаткового роутера. Обмін даними між пристроями відбувається через мережу Wi-Fi та протокол TCP/IP.

Загальна структура системи показана на рис. 1.

Архітектура програмного забезпечення. Програмна реалізація цієї системи складається з трьох окремих частин:

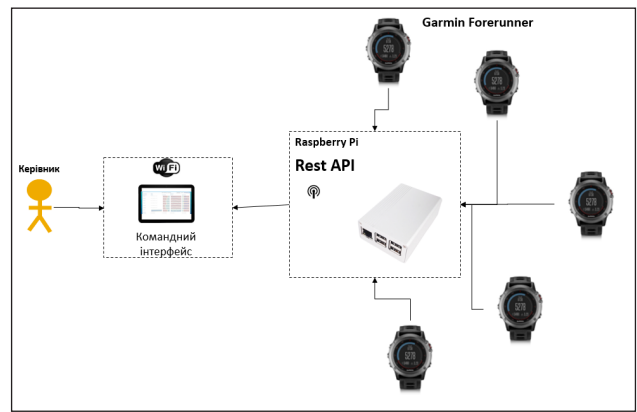


Рис. 1. Загальна архітектура системи

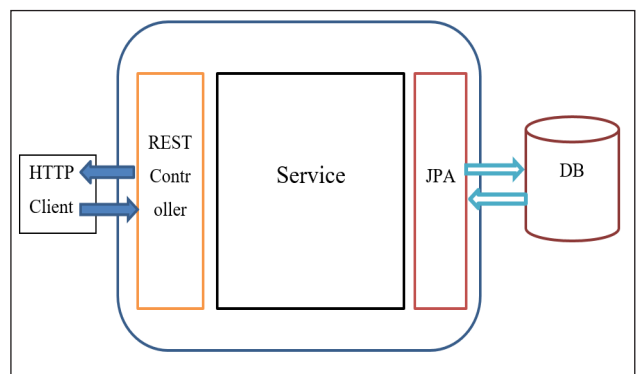


Рис. 2. Архітектура веб-сервера на Java Spring Framework

1. клієнтський додаток для Garmin Forerunner, що надсилає дані на сервер;
2. візуальний інтерфейс для моніторингу даних членів екіпажу;
3. веб-сервер для приймання даних від клієнтів, їх обробки та збереження, контролю за подальшим доступом до них.

Пропонований сервер реалізує REST API інтерфейс [6] для взаємодії з клієнтами. Для написання веб-сервера застосовано мову програмування Java та фреймворк Spring [7], який значно спрощує і прискорює розробку складних веб-сервісів. Архітектура веб-сервера представлена на рис. 2.

Розроблений сервер складається з 3 функціональних шарів:

- REST Controller забезпечує маршрутизацію запитів, перевірку прав доступу клієнта до запитаних даних, запуск необхідної логіки та відповідь клієнтові;
- шар Service зосереджує в собі всю функціональну логіку – обробку фізіологічних даних (частота серцевих скорочень, варіабельність ритму серця, рівень фізичної активності, темпера-



Рис. 3. Блок-схема програми обробки даних

тура тіла) для визначення рівня втоми та стресу у людини;

– JPA – шар, що надає можливість зберігати в зручному вигляді Java-об’єкти в базі даних.

Шар Service завжди виконується в окремому потоці виконання, щоб не блокувати приймання нових вхідних запитів під час обробки попередніх. Структура програми обробки даних показана на рис. 3.

У якості системи управління реляційною базою даних обрана PostgreSQL – сучасна та швидка СУБД із відкритим вихідним кодом і легкою інтеграцією із Java-додатками через драйвер JDBC [8].

Застосована технологія Spring Boot дозволяє скомпілювати єдиний виконуючий файл додатку (розширення *.war) із вбудованим веб-сервером і налаштуваннями конфігурації, що значно спрощує розробку, підтримання та подальшу модифікацію програмної частини системи [9].

Веб-сервер реалізує такі методи API:

– POST /user/{user_id}/data – приймання даних для певного користувача та їх подальша обробка. Цей метод відкритий і не потребує аутентифікації, що спрощує розробку клієнтського додатку для смарт-браслета.

– POST /login – аутентифікація користувача на сервері. Обов’язкова для виконання всіх наступних запитів.

– GET /user/{user_id}/data – отримання списку всіх даних у скороченому вигляді для певного користувача. Цей метод вимагає, щоб користувач був авторизований на сервері.

– GET /user/{user_id}/data/{data_id} – отримання детального опису та результатів для певного ресурсу даних.

Висновки. Нині не реалізовано системи моніторингу фізіологічного стану яхтсменів, що здійснюють тривалі подорожі під час змагань, тому було запропоновано програмно-апаратну систему, що включає смарт-браслети та портативний комп’ютер Raspberry Pi, дані між якими передаються через локальну мережу засобами Wi-Fi і не потребують доступу до Інтернету. На Raspberry Pi виконується веб-сервер, що реалізує Rest API для приймання даних від клієнтів та обробки запитів. Веб-сервер реалізовано мовою програмування Java та на платформі Spring Framework & Spring Boot.

Розроблена система забезпечує моніторинг довільної кількості яхтсменів у зоні радіусом до 100 м (або більше – за наявності додаткового

обладнання), збереження й обробку даних щодо їх фізіологічного стану без необхідності підключення до Інтернету. Наразі система перебуває у тестовому випробуванні під час навколосвітніх гонок яхт Volvo Ocean Race.

Вона також може бути застосована для тривалого моніторингу інших груп користувачів, у т. ч. спеціального призначення, для яких неможливе чи, з огляду на специфіку виконуваних робіт, недоцільне підключення до зовнішніх мереж, у т. ч. до Інтернету.

Список літератури:

1. Sharma Ar., Sharma Am., Gupta A., Tomar D., Mishra A. A review on soldier monitoring system. Intern. Journal of Sci. Research and Management Studies. 2016. Vol. 3, Issue 4. P. 153–156.
2. Ильин В., Моисеенко Е. Медико-физиологические исследования в Первой морской украинской антарктической экспедиции. Бюлетень Українського Антарктичного Центру. 1997. Вип. 1. С. 259–261.
3. Моисеенко Е. Особенности змін функціональних об'ємів серця і показників центральної гемодинаміки людини в умовах тривалого трансатлантичного рейсу. Бюлетень Українського Антарктичного Центру. 2003. Вип. 3. С. 266–271.
4. Барановський Д. Сучасні засоби і пристрої для телемоніторингу життєвих функцій людини: стан проблеми. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки». 2018. Т. 29. № 1. Ч. 1. С. 27–31.
5. Naifacree G. Benchmarking the Raspberry Pi 3 B+. Medium. URL: <https://medium.com/@ghalfacree/benchmarking-the-raspberry-pi-3-b-plus-44122cf3d806>.
6. Representational state transfer. Wikipedia: free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Representational_state_transfer.
7. Projects. Spring Framework. URL: <https://projects.spring.io/spring-framework/>.
8. PostgreSQL. About. URL: <https://www.postgresql.org/about/>.
9. Katamreddy S. Why Spring Boot? URL: <https://dzone.com/articles/why-springboot>.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ЯХТСМЕНОВ

Рассмотрены современные системы мониторинга физиологических параметров человека, а также особые требования к ним для использования на яхтах. Предложено архитектуру такой мобильной системы и её программно-аппаратную реализацию. Система производит регистрацию, обработку и накопление частоты сердечных сокращений, вариабельности ритма сердца, уровня физической активности и температуры тела. Технические средства включают портативный компьютер Raspberry Pi 3 Model B и смарт-браслеты Garmin Forerunner с функцией Wi-Fi. Приведены функции и структура программного обеспечения и его API интерфейс. На сегодня система проходит тестирование во время кругосветных гонок яхт Volvo Ocean Race.

Ключевые слова: системы мониторинга, архитектура клиент-сервер, медицинские гаджеты, яхтсмены, физиологические параметры.

DEVELOPMENT OF SOFTWARE-HARDWARE SYSTEM FOR MONITORING PHYSIOLOGICAL STATE IN YACHTSMEN

Modern systems for monitoring physiological parameters of humans and specific requirements to such systems for using at yachts reconsidered. Architecture of such system and its software-hardware realization are proposed. System performs registration, processing and storing heartbeats, heart-rate variability, degree of physical activity, and body temperature. Technical means includes portable computer Raspberry Pi3 Model Band smart bracelets Garmin Forerunner with Wi-Fi. The functions and structure of the software and its API interface are disclosed. Today system is tested during round-the-world yacht race Volvo Ocean Race.

Key words: monitoring systems, client-server architecture, medical gadgets, yachtsmen, physiological parameters.

Буслов П.В.

Харківський національний університет радіоелектроніки

РОЗРОБКА КЛАСИФІКАЦІЇ СИСТЕМ КОНСОЛІДАЦІЇ КОМЕРЦІЙНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

У статті розроблено класифікацію систем консолідації комерційної інформації. Проаналізовано наявні типології систем консолідації комерційної інформації. Побудовано класифікацію об'єктів систем консолідації комерційної інформації за функціональним призначенням і класифікацію властивостей систем консолідації комерційної інформації. Визначено можливості й переваги розробленої класифікації систем консолідації комерційної інформації.

Ключові слова: класифікація, системи консолідації інформації, системологічний класифікаційний аналіз, правила формальної логіки.

Постановка проблеми. У сучасних умовах існує об'єктивна необхідність дослідження систем консолідації інформації, враховуючи те, що вони дозволяють забезпечити оптимальний формат даних для їх подальшої обробки в межах вирішення визначеного аналітичного завдання стосовно обраної сфери дослідження. Особливо це стосується комерційної діяльності, коли принципово важливим є здійснення реструктуризації інформації, усунення повторень ідентичної інформації, що, у підсумку, підвищує загальну якість корпоративної інформації і, відповідно, рівень довіри споживачів до підприємства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних умовах дослідженню систем консолідації інформації присвятили свої наукові праці численні вітчизняні та закордонні вчені, зокрема: Д. Вандмеєр [2], Д. Ісаєв [3], Г. Калитич [4], Н. Кунанець [5] та ін.

Проте на нинішньому етапі не існує повноцінної класифікації систем консолідації комерційної інформації, яка враховувала б інформацію про зовнішнє, внутрішнє середовище, а також інформацію про підприємство.

Постановка завдання. Метою роботи є розробка класифікації систем консолідації комерційної інформації.

Для досягнення поставленої мети в роботі є доцільними постановка та вирішення таких завдань:

- проаналізувати наявні типології систем консолідації комерційної інформації;
- побудувати класифікацію об'єктів систем консолідації комерційної інформації за функціональним призначенням;

- побудувати класифікацію властивостей систем консолідації комерційної інформації;

- визначити можливості та переваги розробленої класифікації систем комерційної інформації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Присутні лише окремі спроби здійснити типологію систем консолідації інформації на основі різнохарактерних технічних критеріїв, зокрема щодо архітектури збереження інформації, моделі об'єднання інформації, способу обробки запитів користувачів. Крім того, існують вузькоспеціалізовані типології систем консолідації інформації, зокрема такі, що орієнтовані на накопичення й обробку знань, наприклад, виключно про фінанси, клієнтів чи зовнішнє середовище компанії. Проте в межах усіх наведених типологій присутня складність встановлення першочерговості загальних ознак об'єктів у поділі їх множини на підмножини [2; 4].

Недоліками здійснення подібних типологій слід вважати такі:

- вибір із підмножини ознак об'єктів однакового ступеня спільності найбільш суттєвого (ступінь спільності дослідженого об'єкта визначає, якою мірою припускається його вихід за межі заданого критерію еквівалентності);

- складність визначення доцільної кількості ознак і ступенів, а також глибини класифікації [3; 5].

Враховуючи вищезазначене, у роботі пропонується здійснити дослідження та побудову класифікації систем консолідації інформації та властивостей об'єктів класифікації.

Так, на основі системологічного класифікаційного аналізу в роботі було досліджено та розроблено

класифікацію систем консолідації інформації за функціональним призначенням, яка містить класифікацію об'єктів (табл. 1) та класифікацію властивостей (табл. 2) [1; 6].

Метарівень системного опису видів систем консолідації інформації відповідає дуже високому ступеню абстракції та становить інформаційні системи. Відповідно, метаскладовою частиною інформаційних систем у контексті нашого дослідження є системи консолідації інформації.

На першому рівні системи консолідації інформації як складова частина інформаційних систем на метарівні поділяються на деталізовані й агреговані системи консолідації інформації. У свою чергу, на другому рівні деталізовані системи консолідації інформації, як складники систем консолідації інформації на макrorівні, поділяються на системи консолідації інформації про зовнішнє середовище, про внутрішнє середовище та про підприємство.

У свою чергу, на третьому рівні системи консолідації інформації про зовнішнє середовище, які належать до систем консолідації інформації на макrorівні, поділяються на системи консолідації інформації на мікрорівні: системи консолідації інформації про політичний стан, про економічний стан, про природно-географічні умови, про техніко-технологічний рівень розвитку та про соціально-культурні особливості.

Відповідно, на третьому рівні системи консолідації інформації про внутрішнє середовище, які також належать до систем консолідації інформації на макrorівні, поділяються на такі системи консолідації інформації на мікрорівні: про клієнтів, про посередників, про постачальників, про конкурентів і про ринкові умови.

До систем консолідації інформації про підприємство на третьому рівні (який також є макrorівнем класифікації, що підлягає дослідженню та розробці) належать такі системи консолідації інформації на макrorівні: про виробництво, про фінанси, про менеджмент, про маркетинг і про збут.

Класифікацію властивостей представлено у табл. 2 [1; 6].

Побудована класифікація відповідає правилам формальної логіки:

- використовується одна основа розподілу;
- члени класифікації взаємно виключають один одного (відсутній перетин понять) [4; 27].

У процесі виконання роботи була самостійно досліджена та розроблена класифікація систем консолідації інформації, яка має такі переваги:

- формування системного уявлення про наявні системи консолідації інформації відповідно до їх функціонального призначення;
- зручність вибору для використання необхідних систем консолідації інформації як для фахів-

Таблиця 1

Класифікація інформаційних систем

Інформаційні системи	Системи консолідації інформації	Деталізовані системи консолідації інформації	Системи консолідації інформації про зовнішнє середовище	Системи консолідації інформації про політико-правовий стан
			Системи консолідації інформації про внутрішнє середовище	Системи консолідації інформації про економічний стан
				Системи консолідації інформації про природно-географічні умови
				Системи консолідації інформації про техніко-технологічний рівень розвитку
				Системи консолідації інформації про соціально-культурні особливості
				Системи консолідації інформації про клієнтів
			Системи консолідації інформації про підприємство	Системи консолідації інформації про посередників
				Системи консолідації інформації про постачальників
				Системи консолідації інформації про конкурентів
				Системи консолідації інформації про ринкові умови
				Системи консолідації інформації про виробництво
				Системи консолідації інформації про фінанси
				Системи консолідації інформації про менеджмент
				Системи консолідації інформації про маркетинг
			Системи консолідації інформації про збут	
Агреговані системи консолідації інформації				

ців підприємств, організацій, установ, так і для звичайного користувача;

- можливість чіткого відображення функціональних властивостей об'єктів класифікації на підставі сформульованих родовидових визначень;
- чітка відповідність об'єктів і властивостей систем консолідації інформації.

Висновки. Провівши дослідження, ми отримали такі результати:

1. Проаналізовано наявні типології систем консолідації інформації. Підкреслено, що нині подібні типології формуються переважно на основі різнохарактерних технічних критеріїв, зокрема щодо архітектури збереження інформації, моделі об'єднання інформації, способу обробки запитів користувачів. Крім того, існують вузькоспеціалізовані типології систем консолідації інформації, зокрема такі, що орієнтовані на накопичення й обробку знань, наприклад, виключно про фінанси, клієнтів чи зовнішнє середовище компанії. Проте в межах усіх наведених типоло-

гій присутня складність встановлення першочерговості загальних ознак об'єктів у поділі їх множини на підмножини.

2. Побудовано класифікацію об'єктів систем консолідації комерційної інформації за функціональними призначенням. Звернено увагу на те, що метаскладовою частиною інформаційних систем у контексті нашого дослідження є системи консолідації інформації. Зокрема, на першому рівні системи консолідації інформації поділяються на деталізовані й агреговані.

3. Побудовано класифікацію властивостей систем консолідації комерційної інформації. Виділено такі властивості систем консолідації інформації: ті, що здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію про зовнішнє середовище, внутрішнє середовище, підприємство, та ті, що здійснюють накопичення знань і надають узагальнену інформацію для прийняття рішень.

4. Визначено можливості й переваги розробленої класифікації систем комерційної інформації

Таблиця 2

Класифікація властивостей інформаційних систем

Здійснюють пошук, обробку та зберігання інформації	Здійснюють накопичення знань і надають інформацію для прийняття рішень	Здійснюють накопичення знань і надають інформацію щодо законодавчого регулювання функціонування ринку
		Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо тенденцій зміни валового національного продукту, рівня інфляції, оподаткування, регулювання грошової маси
		Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо особливостей клімату й інфраструктури території
		Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо рівня розвитку науки та техніки
		Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо соціально-культурних умов і демографічної ситуації
	Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію про внутрішнє середовище	Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо мотивації, прихильності, намірів клієнтів і їх ставлення до підприємства
		Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо умов функціонування посередників і співробітництва з ними
		Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо характеристик продукції й умов співробітництва з постачальниками
		Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо ринкової позиції конкурентів
		Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо тенденцій зміни ринкової кон'юнктури
	Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію про внутрішнє середовище підприємства	Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо виробничих процесів на підприємстві
		Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо фінансового стану підприємства
		Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо стратегії управління підприємством
		Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо комплексу маркетингу підприємства
		Здійснюють накопичення знань і надають зведену інформацію щодо організації збутової та логістичної діяльності на підприємстві
	Здійснюють накопичення знань і надають узагальнену інформацію для прийняття рішень	

ції: побудована класифікація повністю відповідає правилам формальної логіки; формує системне уявлення щодо наявних систем консолідації комерційної інформації; уможливорює зручність вибору персоналом необхідних для користування систем консолідації інформації.

Список літератури:

1. Бондаренко М.Ф. Информационному обществу – профессионалов в области информации (Business Intelligence и Knowledge Management на службе государству). URL: www.it2b.ru/it2b2.view3.page123.html.
2. Вандермеер Д. Консолидация. Москва, 2015. 384 с.
3. Исаев Д.В. Автоматизированные системы формирования консолидированной финансовой отчетности. Москва, 2006. 336 с.
4. Калитич Г.І. Консолидація інформації, знань і мудрості як проектування і основа гармонійного поступу України. НТІ. 2008. № 1. С. 51.
5. Кунанець Н.Е., Пасічник В.В. Консолидація інформації та інформаційна безпека. Інформація та економічна безпека (INFECO 2010): тези доповідей III Міжнародна науково-практичної конференції (Харків, 15–16 травня 2010 р.). Харків, 2010. С. 131–133.
6. Соловьева Е.А. Естественная классификация: системологические основания. Харьков, 1999. 222 с.

РАЗРАБОТКА КЛАССИФИКАЦИИ СИСТЕМ КОНСОЛИДАЦИИ КОММЕРЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В статтє розроблена класифікація систем консолідації комерційної інформації. Проаналізовані існуючі типології систем консолідації комерційної інформації. Побудована класифікація об'єктів систем консолідації комерційної інформації по функціональному назначенню і класифікація властивостей систем консолідації комерційної інформації. Визначені можливості і переваги розробленої класифікації систем консолідації комерційної інформації.

Ключевые слова: класифікація, системи консолідації інформації, системологічний класифікаційний аналіз, правила формальної логіки.

DEVELOPMENT OF CLASSIFICATION OF SYSTEMS OF CONSOLIDATION OF COMMERCIAL INFORMATION

The classification of systems of consolidation of commercial information is developed in the article. The existing typologies of systems of consolidation of commercial information are analysed. The classification of objects of systems of consolidation of commercial information on functional criteria is constructed. The classification of properties of systems of consolidation of commercial information is constructed. The opportunities and advantages of the developed classification of systems of consolidation of commercial information are defined.

Key words: classification, systems of consolidation of information, systemological classification analysis, rules of formal logic.

УДК 621.313.12.001.57

Вовк І.В.

Одеський національний політехнічний університет

Дуба І.Е.

Одеський національний політехнічний університет

Конущбаєва Т.В.

Одеський національний політехнічний університет

Беглов К.В.

Одеський національний політехнічний університет

ВОДОГРІЙНА КОТЕЛЬНЯ ЯК ОБ'ЄКТ КЕРУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ

Використання біогазу є одним із перспективних напрямків розвитку енергетики України, але заміна природного газу на біогаз викликає ряд проблем в експлуатації теплогенеруючого обладнання. Основною проблемою є коливання складу газу, що йде на горіння. Через різний склад газу відбуваються значні коливання витрат повітря. Як наслідок, змінюються властивості газоповітряного тракту і теплообмінних процесів. Розглянуто вплив зміни складу палива, що подається до топкового пристрою, на потужність водогрійної котельні. Для досягнення поставленої мети вдосконалено математичну модель спалювання газоподібного палива шляхом врахування нелінійної залежності кількості тепла, що подається до топкового пристрою, та врахування зміни умов теплопередачі за значних коливань витрати димових газів. На базі розробленої імітаційної моделі 3 котлів КВГМ-50 проаналізовані динамічні характеристики у вигляді кривих розгону, отриманих шляхом збурення теплотворною здатністю палива.

Ключові слова: біогаз, котельня установка, математична модель, перехідний процес.

Постановка проблеми. Нині активно ведуться дослідження з використання поновлюваних джерел енергії. Зокрема, розглядаються питання використання в якості палива біогазу, отриманого шляхом переробки органічних відходів сільськогосподарської діяльності. Заміна природного газу на біогаз викликає ряд проблем в експлуатації теплогенеруючого обладнання.

Основною такою проблемою можна вважати значні коливання складу газу, що йде на горіння. Це викликає значні коливання витрати повітря і, як наслідок, зміну аеродинамічних властивостей газоповітряного тракту і теплообмінних процесів у ньому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження зі спалювання біопалива в котельних установках проводяться досить давно. Вже створено й експлуатується багато котельних установок, які використовують у якості основного палива біогаз чи рідке біопаливо. Проте ті котли, що експлуатуються, вже розраховані на спалювання біогазу, причому вважається, що склад палива не змінюється.

Дослідження спалювання несертифікованого палива, до якого й належить біогаз, проводилися в обмеженій кількості робіт.

Так, математична модель спалювання несертифікованого палива розглянута у роботі [1, с. 44–52]. Проте в якості палива розглянуто попутний нафтовий газ, який спалюється в паровому котлі.

У роботах [2, с. 32–36] та [3, с. 79–84] показано вплив складу палива на умови тепловіддачі у хвостових поверхнях нагріву котлів. Також, як і в попередній роботі, приклад був наведений для газу, теплотворна спроможність якого більша, ніж у природного газу.

Якщо ж спалювати газ із теплотворною спроможністю меншою, ніж у природного газу, то, як це показано в роботах [4] та [5], необхідно збільшувати площу теплообмінної поверхні для забезпечення постійної потужності котла. Цього можна досягнути, використовуючи наявне теплогенеруюче обладнання, якщо вмикати або вимикати його за необхідності.

Постановка завдання. Дослідити вплив зміни складу палива, що подається до топкового пристрою, на потужність водогрійної котельні.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно вдосконалити математичну модель спалювання несертифікованого газоподібного палива шляхом врахування нелінійної зміни кількості тепла, що подається до топкового пристрою, та врахування зміни умов теплопередачі за значних коливань витрати димових газів.

Для дослідження статичних і динамічних властивостей було обрано водогрійний котел КВГМ-50, як найпоширеніший у комунальному господарстві районних котельень.

У першу чергу, уточнимо модель виділення тепла у процесі горіння.

Відомо, що тепло, яке виділяється у процесі спалювання, може бути розраховане за формулою:

$$Q_G = M_{bb} Q_p^n \quad (1)$$

Q_F – кількість тепла, що відводиться димовими газами;

Q_{pn} – нижча теплота згоряння робочої маси палива;

M_{bb} – витрата палива.

Оскільки модель спалювання розглядається у відхиленнях, проведемо лінеаризацію (1) та запишемо вираз у відхиленнях:

$$\bar{Q}_G + {}''Q_G = (\Delta Q_p^n + \bar{Q}_p^n) \cdot (\bar{M}_B + {}''M_B) \quad (2)$$

Після відкриття дужок і врахування виразу (2) можна записати:

$${}''Q_G = \bar{M}_B {}''Q_p^n + {}''M_B \bar{Q}_p^n + {}''M_B \bar{Q}_p^n \quad (3)$$

Зазвичай другий доданок відкидається як такий, що має другий порядок малості. Однак, оскільки відхилення теплотворної здатності біогазу настільки велике, розрахунок у моделі проводиться за виразом (3).

Схема моделювання виразу (3) наведена на рис. 1.

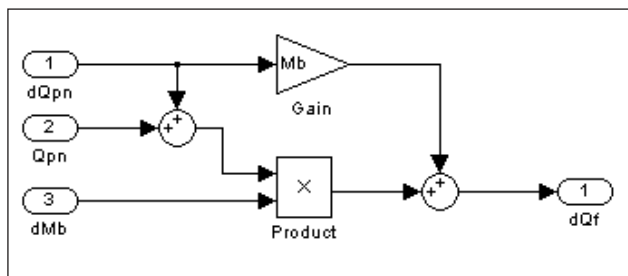


Рис. 1. Схема моделювання виділення тепла в топці

Далі розглянемо й уточнимо модель передачі тепла конвекцією.

Зміна коефіцієнту надлишку повітря в області достатньо великих надлишків незначно впливає на Q_G , але може сильно відбитися на розподілі теплосприяння між окремими поверхнями нагріву. Зі зміною α зв'язана зміна питомої кількості димових газів i , як наслідок, температури газів θ_G у топці, що, як відомо, впливає на передачу тепла радіацією. Відповідні зміни теплопередачі, але протилежного знаку, виникають у конвективних поверхнях нагріву.

Тепло, що виділяється в топці, сприймається частково шляхом радіації поверхнями нагріву, розташованими в топці, а частково – димовими газами, які після цього, переважно за допомогою конвекції, передають його конвективним поверхням нагріву. Процеси, що відбуваються, є наслідком термодинамічних і гідродинамічних явищ.

Передача тепла відбувається спочатку до стінок труб, через які тепловий потік теплопровідністю передається робочому тілу. У цих процесах у разі зміни режиму бере участь досить значна ємність, що акумулює маси металу поверхонь нагріву. Внаслідок того, що димові гази прилягають до великих мас, які не належать безпосередньо до поверхонь нагріву (обмурівка, ізоляція), останні також беруть участь у процесах, пов'язаних зі зміною режиму.

Котельний агрегат може бути представлений у вигляді теплообмінника. Введемо допущення, що в теплообміннику має місце повне перемішування як на стороні робочого тіла, так і на стороні газів, що гріють.

Розрахунки виходять із розгляду елемента котельної поверхні, зображеного на рис. 2.1. Явища в такому елементі за прийнятих допущень описуються виразами:

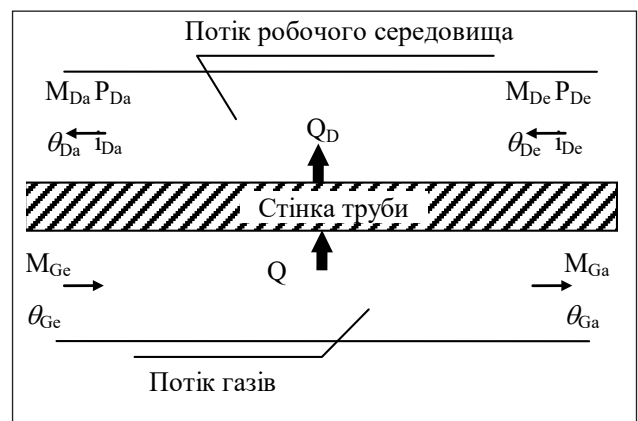


Рис. 2. Елемент теплообмінної поверхні
Тепловий баланс на боці газу, що гріє:

$$M_{Ge} c_G \vartheta_{Ge} - M_{Ga} c_G \vartheta_{Ga} = Q + m_G c_G \frac{d\vartheta_{Gm}}{dt} \quad (9)$$

Тепловий баланс на боці робочого тіла:

$$M_{De}i_{De} + Q = M_{Da}i_{Da} + m_D \frac{du_{Dm}}{dt} \quad (10)$$

Тепловий баланс для метала труб:

$$Q - Q_D = M_R c_R \frac{d\theta_m}{dt} \quad (11)$$

Баланс механічної енергії для робочого тіла:

$$P_{De} - P_{Da} = k_1 M_D^2 + k_2 \frac{dM_D}{dt} \quad (12)$$

Баланс речовини на стороні газів:

$$M_{Ge} = M_{Ga} \quad (13)$$

Баланс речовини на стороні робочого тіла:

$$M_{De} = M_{Da} \quad (14)$$

Теплопередача в системі «газ, що гріє – труба» опроміненням:

$$Q = k_3 (\varepsilon_g T_{Gm}^4 - A_g T_{Rm}^4) \quad (15),$$

конвекцією:

$$Q = k_4 M_G^{0.33} (\vartheta_m - \theta_m) \quad (16)$$

Передача тепла від стінки труби робочому тілу:

$$Q_D = A_H \alpha_D (\theta_m - \vartheta_{Dm}) = k_5 M_D^{0.8} (\theta_m - \vartheta_{Dm}) \quad (17),$$

де A_H – площа поверхні нагріву;

M_G – витрата газів;

m_G – маса газу в елементі;

M_D – витрата робочого тіла;

m_D – маса робочого тіла в елементі;

m_R – маса метала труб;

c_G – питома теплоємність газів;

c_D – питома теплоємність робочого тіла;

c_R – питома теплоємність метала труб;

i_D – ентальпія робочого тіла;

u_D – внутрішня енергія робочого тіла;

θ_m – температура метала труб;

ϑ_{Gm} – температура газів;

ϑ_D – температура робочого тіла;

P_D – тиск робочого тіла;

Q – тепловий потік від газу до стінки;

Q_D – тепловий потік від стінки до робочого тіла;

α_D – коефіцієнт теплопередачі від стінки до робочого тіла;

k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 – коефіцієнти.

Параметри з індексом m є середніми значеннями, що підраховані для елемента.

Щоб встановити залежність між підведенням тепла і рівняннями (9), (13), (15), (16), необхідно визначити зв'язок між витратою димових газів, надлишком повітря і тепловиділенням в топці.

Для витрати газу маємо:

$$M_G = M_{Bb} + \alpha k_L M_{Bb} = M_{Bb} (1 + \alpha k_L) \quad (18)$$

Підставляючи з (1) M_{Bb} , одержимо:

$$M_G = \frac{1 + \alpha k_L}{Q_p^n} Q_F \quad (19)$$

Для малих відхилень маємо:

$$\bar{M}_G + \Delta M_G = \frac{1 + \bar{\alpha} k_L + \Delta \bar{\alpha} k_L}{Q_p^n} (\bar{Q}_F + \Delta Q_F) \quad (20)$$

Звідки, нехтуючи доданками $\Delta \alpha \Delta Q_F$ та $\Delta k_L \Delta Q_F$ через їхню малість і враховуючи рівняння (19), одержуємо:

$$\Delta M_G = \frac{k_L \bar{Q}_F}{Q_p^n} \Delta \alpha + \frac{1 + \bar{\alpha} k_L}{Q_p^n} \Delta Q_F = k_a \Delta \alpha + k_Q \Delta Q_F \quad (21)$$

Використовуючи ці залежності для різних елементів котла і, в першу чергу, топку (індекс 1) з урахуванням (9) і (13), знаходимо (підведене тепло дорівнює тепловиділенню в топці $Q_F \vartheta_{m1} \vartheta_{a1}$, $M_1 = M$):

$$Q_F - M c \vartheta_{a1} = Q_1 + m_1 c \frac{d\vartheta_{a1}}{dt} \quad (22)$$

Це рівняння для малих відхилень набуває вигляду:

$$\bar{Q}_F + \Delta Q_F - (\bar{M} + \Delta M) c (\bar{\vartheta}_{a1} + \Delta \vartheta_{a1}) = \bar{Q}_1 + \Delta Q_1 + m_1 c \frac{d\vartheta_{a1}}{dt} \quad (23)$$

Виключаючи з цього виразу члени, які стосуються стану, що встановився, одержуємо:

$${}''Q_F - c \bar{\vartheta}_{a1} {}''M = {}''Q_1 + \bar{M} c {}''\vartheta_{a1} + m_1 c \frac{d\vartheta_{a1}}{dt} \quad (24)$$

Окрім цього, для малих відхилень, диференціюючи рівняння (15) за T_{Gm} , знаходимо ($T_{Gm} = \vartheta_{a1} + 273$):

$$\Delta Q_1 = 4k_3 \varepsilon_a T_{Gm}^3 \Delta \vartheta_{a1} = k_s \Delta \vartheta_{a1} \quad (25),$$

звідки

$$\Delta \vartheta_{a1} = \frac{1}{k_s} \Delta Q_1 \text{ и } \frac{d\vartheta_{a1}}{dt} = \frac{1}{k_s} \frac{dQ_1}{dt}$$

Після підстановки в (24) одержуємо:

$$\Delta Q_F - c \bar{\vartheta}_{a1} \Delta M = \left(1 + \frac{\bar{M} c}{k_s}\right) \Delta Q_1 + \frac{m_1 c}{k_s} \frac{dQ_1}{dt} \quad (26)$$

або

$$\frac{k_s}{k_s + \bar{M} c} \Delta Q_F - \frac{k_s c \bar{\vartheta}_{a1}}{k_s + \bar{M} c} \Delta M = \Delta Q_1 + \frac{m_1 c}{k_s + \bar{M} c} \frac{dQ_1}{dt} \quad (27)$$

Тут коефіцієнт $\frac{m_1 c}{k_s + \bar{M} c} = T$ має розмірність часу.

У спрощеній формі рівняння (27) може бути записане таким чином:

$$a_1 \Delta Q_F - b_1 \Delta M = \Delta Q_1 + T_1 \frac{dQ_1}{dt} \quad (28)$$

Воно встановлює залежність теплопередачі радіаційним поверхням нагріву від тепловиділення в топці ΔQ_F і витрати димових газів ΔM_G . Якщо замість ΔM_G задається відповідна зміна коефіцієнту надлишку повітря, то з урахуванням (21) одержуємо:

$$(a_1 - b_1 k_Q) \Delta Q_F - b_1 k_a \Delta \alpha = \Delta Q_1 + T_1 \frac{dQ_1}{dt} \quad (29)$$

Друга частина котла стосується конвективних поверхонь нагріву.

Для аналізу процесів, що відбуваються в конвективній частині котла, необхідно передусім визначити температуру газів на виході з першої частини. Відповідні залежності можуть бути отримані з рівняння (27), якщо в ньому відповідно до (26) виразити ΔQ_1 у вигляді функції $\Delta \vartheta_{a1}$. Після ділення на k_s одержуємо:

$$\frac{1}{k_s + \bar{M}c} "Q_F - \frac{c\bar{g}_{a1}}{k_s + \bar{M}c} "M = "g_{a1} + T_1 \frac{d\vartheta_{a1}}{dt} \quad (30)$$

або після скорочення:

$$\frac{a_1}{k_s} "Q_F - \frac{b_1}{k_s} "M = "g_{a1} + T_1 \frac{d\vartheta_{a1}}{dt} \quad (31)$$

Якщо замість ΔM задана зміна коефіцієнту надлишку повітря, то за аналогією з (29) можна записати:

$$\frac{a_1 - b_1 k_Q}{k_s} "Q_F - \frac{b_1 k_{\pm}}{k_s} "M = "Q_1 + T_1 \frac{dQ_1}{dt} \quad (32)$$

Для конвективних поверхонь нагріву справедливі рівняння (9), (13) і (16). Вихідна величина першої частини котла $\Delta M_1 = \Delta M$ та $\Delta \vartheta_{a1}$ є вхідною величиною для другої частини, тобто

$$\Delta M_2 = \Delta M_1 \text{ і } \Delta \vartheta_{e2} = \Delta \vartheta_{a1} \quad (33)$$

Написавши означені рівняння для малих відхилень і виключивши члени, які стосуються статичного режиму, з (9) і (13) при $\vartheta_{m2} = 0.5(\vartheta_{e1} + \vartheta_{a2})$, одержуємо:

$$\begin{aligned} c\vartheta_{e2}\Delta M_G + \bar{M}_G c \Delta \vartheta_{e2} - c\bar{g}_{a2}\Delta M - \bar{M}_G c \Delta \vartheta_{a2} = \\ = \Delta Q_2 + \frac{mc}{2} (\Delta \vartheta'_{e2} + \Delta \vartheta'_{a2}) \end{aligned} \quad (34)$$

та з (16):

$$\Delta Q_2 = 0.33k_4 \bar{M}_G^{0.33} \frac{\bar{g}_{e2} + \bar{g}_{a2} - 2\theta_m}{2\bar{M}_G} \Delta M + 0.5k_4 \bar{M}_G^{0.33} (\Delta \vartheta_{e2} + \Delta \vartheta_{a2})$$

Виключивши з цих рівнянь $\Delta \vartheta_{a2}$, одержуємо:

$$a_2 \Delta M_G + b_2 \frac{dM_G}{dt} + c_2 \Delta \vartheta_{e2} = \Delta Q_2 + T_2 \frac{dQ_2}{dt} \quad (35),$$

$$\text{де } a_2 = c \frac{0.33(4\vartheta_{e2} - \vartheta_{a2} - 3\theta_{m2})}{1 + \frac{2c}{k_4} \bar{M}_G^{0.33}}$$

$$b_2 = c \frac{0.33m_2(\vartheta_{e2} - \vartheta_{a2} - 2\theta_m)}{\bar{M}_G \left(1 + \frac{2c}{k_4} \bar{M}_G^{0.33}\right)}$$

$$c_2 = \frac{1}{\frac{1}{k_4 \bar{M}_G^{0.33}} + \frac{1}{2c\bar{M}}}$$

$$T_2 = \frac{cm_2}{k_4 \bar{M}_G^{0.33} + 2c\bar{M}}$$

T_2 – стала часу, яка характеризує інерцію теплосприйняття конвективною частиною щодо топкової камери.

Реалізацію розглянутої моделі з урахуванням роботи [3] зроблено за допомогою частини схеми, наведеної на рис. 2.

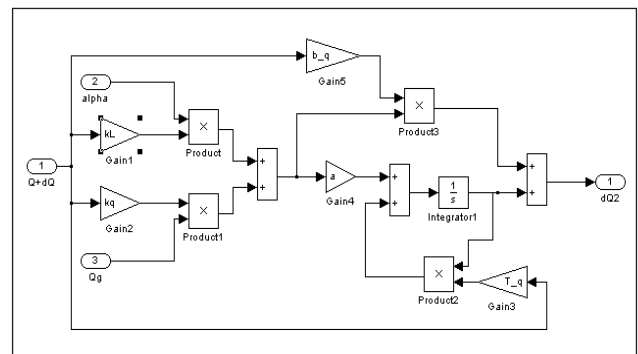


Рис. 2. Схема моделювання відведення тепла в конвективній частині

Після теплового розрахунку котла були отримані коефіцієнти диференціальних рівнянь, що наведені вище.

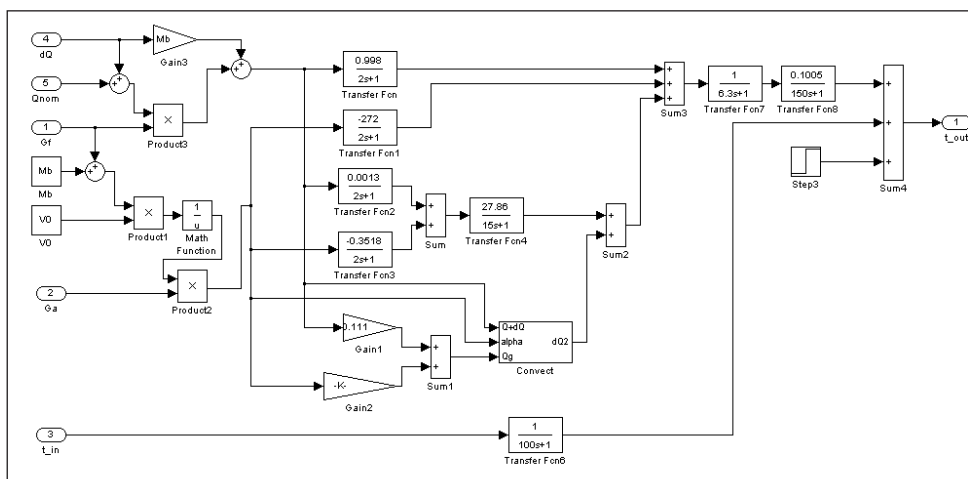


Рис. 3. Схема моделювання водогрійного котла

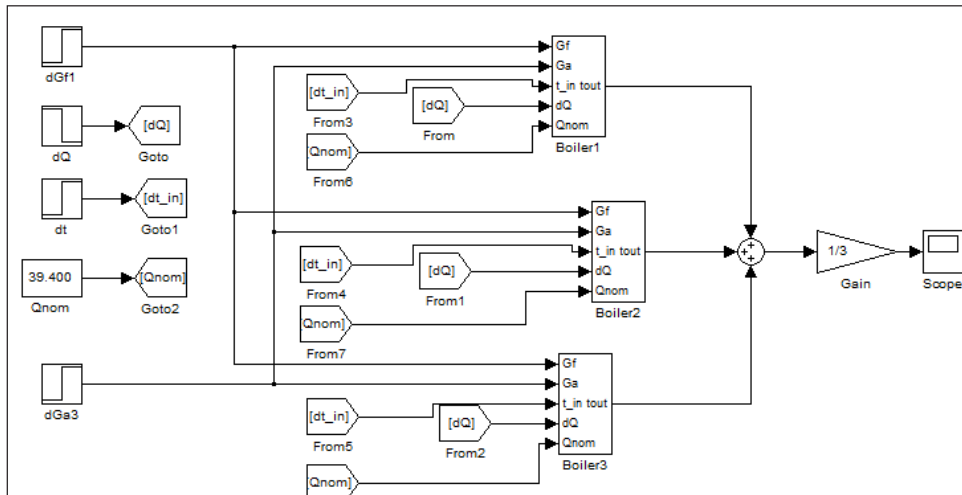


Рис. 4. Імітаційна модель котельні

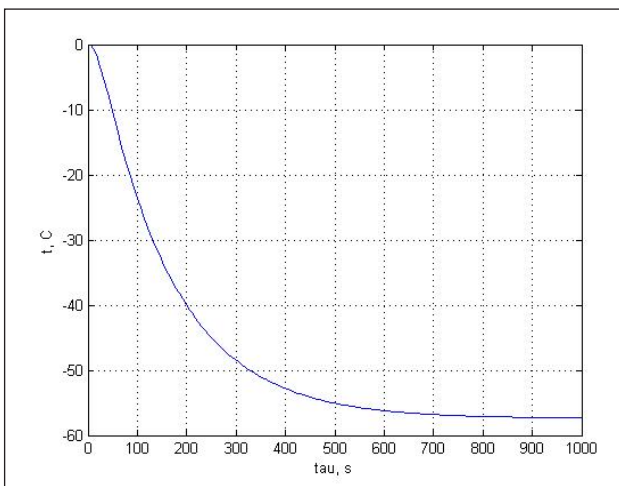


Рис. 5. Перехідний процес за каналом «Теплотворна спроможність палива Q_p^H – температура води після котлів t_{out} »

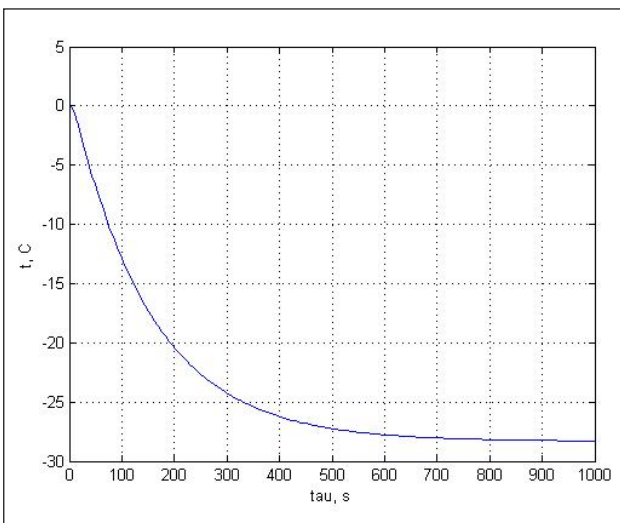


Рис. 6. Перехідний процес за каналом «Витрата повітря M_L – температура води після котлів t_{out} »

Імітаційна модель котлареалізована в пакеті Matlab/Simulink. Схема моделювання наведена на рис. 3.

Входами моделі є dQ – відхилення теплотворної спроможності палива; $Qnom$ – номінальне значення теплотворної спроможності палива (номінальне прийняте значення для природного газу); Gf – відхилення витрати палива; Ga – відхилення витрати повітря; t_{in} – відхилення температури води на вході в котел. Крім того, на цьому етапі дослідження прийняті постійними номінальні значення витрати палива – M_b – та стехіометричної витрати повітря – V_0 . Вихідним параметром моделі є температура води на виході з котла.

Поєднавши три моделі котлів, з'єднавши їх паралельно, ми отримали імітаційну модель котельні, яка наведена на рис. 4.

Використовуючи цю модель, ми отримали криві розгону за каналами «Витрата палива – температура води після котлів», «Теплотворна спроможність палива – температура води після котлів», «Витрата повітря – температура води після котлів».

Графіки кривих розгону наведені на рис. 5, 6, 7 відповідно.

Як видно з графіків, за всіма каналами кожен котел може бути описаний інерційною ланкою першого порядку. Постійна часу визначається процесом акумуляції тепла в металі труб і передачею тепла до теплоносія. Склад палива на цю характеристику не впливає.

Коефіцієнти передачі мають такі значення:

$$\text{за каналом } Q_p^H - t_{out} k = 37.5 \frac{^{\circ}\text{C}}{i \Delta \tau / i^3} .$$

$$\text{за каналом } M_L - t_{out} k = -2.7 \frac{^{\circ}\text{C}}{i^3/c}$$

$$\text{за каналом } M_b - t_{out} k = 3.7 \frac{^{\circ}\text{C}}{i^3/c} .$$

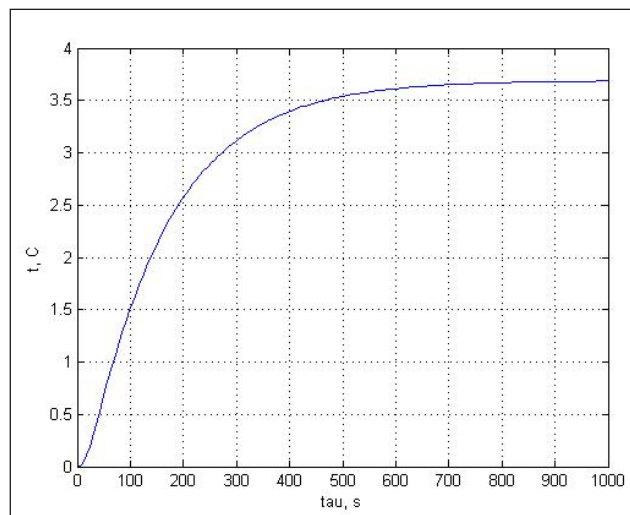


Рис. 7. Перехідний процес за каналом «Витрата палива M_b – температура води після котлів t_{out} »

Але під час подачі одночасного збурення по каналах витрати палива та теплотворної спромож-

ності палива було виявлено, що для компенсації зменшення теплотворної спроможності палива в 2 рази витрату палива потрібно збільшити в 6 разів.

Висновки. У роботі розглянуто вплив теплотворної спроможності палива на статичні та динамічні властивості водогрійного котла.

Отримала подальший розвиток математична модель водогрійного котла: відомі лінійні передатні функції було доповнено нелінійною залежністю їхніх коефіцієнтів від величини збурення теплотворною спроможністю палива.

Виявлено, що у разі зменшення теплотворної спроможності палива в два рази, наприклад, під час переведення котла з природного газу на спалювання біогазу, витрата палива повинна бути збільшена в 6 разів.

Цей факт можна пояснити складними теплогідравлічними процесами, які протікають у конвективних поверхнях нагріву, а саме зміною коефіцієнта теплопередачі від газів до стінок конвективної поверхні.

Список літератури:

1. Maksimov M.V., Lozhechnikov V.F., Dobrovolskaya T.S., Bondarenko A.V. Mathematical model of non-certified burning fuels. East European journal of advanced technologies. 2014. Vol. 2. № 8 (68). P. 44–52. URL: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/22420/21760>.
2. Brunetkin O.I., Gorban S.O. Heat transfer optimization of heat exchange surfaces of boiler equipment with decrease in consumption of combustion products. Proceedings of the Odessa Polytechnic University. 2017. Vol. 3 (53). P. 32–36.
3. Brunetkin O.I., Gusak A.V. Determination of the range of change of the convective heat transfer coefficient during the burning of alternative types of gaseous fuel. Proceedings of the Odessa Polytechnic University. Vol. 2 (46). P. 79–84.
4. Лысюк А.В., Усовершенствование АСУ барабанного котла для сжигания горючих искусственных газов. Автоматика-2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління (м. Київ, Україна, 13–15 вересня 2017 р.). Київ, 2017.
5. Лысюк А.В., Беглов К.В. Оптимизация работы группы котельных агрегатов при сжигании несертифицированного топлива. Автоматика-2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління (м. Київ, Україна, 13–15 вересня 2017 р.). Київ, 2017.

ВОДОГРЕЙНАЯ КОТЕЛЬНАЯ КАК ОБЪЕКТ УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

Использование биогаза является одним из перспективных направлений развития энергетики Украины, но замена природного газа на биогаз вызывает ряд проблем при эксплуатации теплогенерирующего оборудования. Основной проблемой является колебание состава газа, идущего на горение. Из-за разного состава газа происходят значительные колебания расхода воздуха. Как следствие, меняются свойства газозвушного тракта и теплообменных процессов. Рассмотрено влияние изменения состава топлива, подаваемого к топочному устройству, на мощность водогрейной котельной. Для достижения поставленной цели усовершенствована математическая модель сжигания газообразного топлива путем учета нелинейной зависимости количества тепла, подаваемого к топочному устройству, и учёта изменения условий теплопередачи при значительных колебаниях расхода дымовых газов. На базе разработанной имитационной модели 3 котлов КВГМ-50 проанализированы динамические характеристики в виде кривых разгона, полученных при возбуждении теплотворной способностью топлива.

Ключевые слова: биогаз, котельная установка, математическая модель, переходный процесс.

WATER-HEATING BOILER-HOUSE AS AN OBJECT OF POWER CONTROL

The use of biogas is one of the most promising directions for the development of the Ukrainian energy sector, but the replacement of natural gas with biogas causes a number of problems in the operation of heat generating equipment. The main problem is the fluctuations in the composition of the gas going to combustion. Because of the different composition of the gas, there are significant fluctuations in airflow and, as a consequence, the properties of the gas-air path and heat-exchange processes change. The influence of the change in the composition of the fuel supplied to the combustion device on the power of the boiler is considered. To achieve this goal, the mathematical model of burning gaseous fuels has been improved by taking into account the nonlinear dependence of the amount of heat supplied to the furnace and taking into account changes in heat transfer conditions with significant flue gas flow fluctuations. Based on the developed simulation model of 3 boilers KVGМ-50, dynamic characteristics in the form of acceleration curves obtained when fuel calorific value is excited are analyzed.

Key words: *biogas, boiler installation, mathematical model, transitional process.*

Воєводін Є.В.

Черкаський національний університет імені Богдана Хмельницького

МЕТОДИ ТЕСТУВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СТРАТЕГІЙ РОЗПОДІЛЕННЯ В СИСТЕМАХ ОРКЕСТРУВАННЯ ВІРТУАЛЬНИХ КОНТЕЙНЕРІВ

У статті описуються методи тестування стратегій розподілення в ізолюваному середовищі з імітацією навантаження. Оскільки кожна стратегія вирішує окрему конкретну проблему в доменній області, то критерії для їх тестування та підходи є зовсім різними. Спочатку розглядається структура системи, в контексті якої проводиться тестування, й описуються методи, також дається визначення стратегії розподілення та коротко описуються стандартні рішення. Першим методом, що розглядається, є розподілення до першого відхилення. Такий підхід допомагає зрозуміти, яка зі стратегій надає змогу розподілити більше контейнерів без єдиної помилки. Другим методом є розподілення повноти кластеру. На відміну від першого, цей метод дозволяє проаналізувати кількість відхилених і вдало заповнених контейнерів до того моменту, поки у кластері не буде місця для мінімально можливої за розміром конфігурації. Окрім методів тестування, також розглядаються і способи аналізу та візуалізації даних, отриманих шляхом багатократного проведення експериментів.

Ключові слова: розподілення, методи тестування, системне тестування, балансування, віртуалізація, контейнер, система оркестрування.

Постановка проблеми. Віртуалізація процесу розробки та використання віртуальних Linux-контейнерів для запуску додатків уже давно не є новинкою в сучасному світі розподілених систем. Витісняючи гіпервізори за рахунок своєї простоти й ефективності, такі технології, як LXC, Docker, rkt, OpenVZ, набувають популярності та практичної значимості. З розвитком технологій віртуалізації також розвиваються і засоби роботи з ними. Одним із таких засобів є системи оркестрування віртуальних контейнерів (далі – СОВК). Такі системи дають змогу використовувати технологію віртуалізації на множині вузлів, забезпечуючи їхню ефективну роботу, що відкриває нові можливості для розподілених додатків і більш складних систем. До таких СОВК можна віднести Docker Swarm, Kubernetes, MesosMarathon.

СОВК мають змогу працювати з динамічним рядом конфігурацій контейнерів, тобто послідовно здійснювати розподілення ресурсів за вимогою. Однією із задач СОВК є пошук вільного місця у кластері, т. зв. вузла, який би задовольнив вимоги контейнера, що створюється конфігурацією. Для виконання цієї задачі СОВК використовують різні стратегії розподілення. У випадку із СОВК Docker Swarm ними є стратегія розподілення заповненням, стратегія розподілення поширенням і стра-

тегія розподілення на випадково обраних вузлах. Кожна зі стратегій описується характерними ідентифікаторами ефективності та використовується для конкретних цілей. Так, наприклад, стратегія розподілення поширенням використовується для досягнення максимальної відмовостійкості системи [1], що працює в кластері СОВК.

Від ефективності стратегії розподілення та структури кластеру залежить ефективність роботи СОВК, кількість ресурсів, які використовуються, стабільність роботи системи розподілення та додатків, що запуснені в межах її кластеру. Наприклад, у разі неефективного розподілення контейнерів СОВК може динамічно додавати нові вузли, що потребує більшої кількості ресурсів і затрат на забезпечення їхньої роботи. Результат роботи стратегій розподілення є критично важливим для СОВК, оскільки від нього залежить поведінка системи, наприклад у разі неефективного розподілення. Для нової конфігурації може не вистачати місця в кластері, відповідно, СОВК буде змушена або відхилити запит на створення контейнера, або додати новий вузол до кластеру, що відповідно потребує часу та ресурсів апаратного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми використання наявних методів у своїй

роботі описує Є.В. Воєводін [2]. Автор порівнює між собою методи розподілення заповнення і розподілення поширенням, наводячи їхні переваги та недоліки. У роботі продемонстровано, за яких умов стратегії здійснюють неефективне балансування, й описується можлива поведінка СОВК у критичних випадках.

У своїх інших роботах [3; 4] Є.В. Воєводін та В.С. Авраменко описують метод розподілення контейнерів із використанням штучних нейронних мереж, зокрема самоорганізаційних карт Кохонена (далі – СКК) [5]. У ході досліджень проводиться ряд експериментів над стратегіями та здійснюється порівняння ефективності результатів розподілення. У випадку із СКК ефективність розподілення залежить від багатьох критеріїв, таких як швидкість навчання карти чи її топології. Для перевірки ефективності розподілення використовуються упаковка до першого відхилення та до повноти кластеру. Представлені у вигляді різних графіків результати тестування демонструють, що ефективність стратегій залежить від вибірки та структури кластеру.

Нову стратегію розподілення ресурсів у системі Docker Swarm, що базується на угоді про рівень послуг, у своїй роботі описують Крістоф Серін та ін. [6]. Спочатку автори детально розбирають структуру СОВК та інтерфейсу стратегії розподілення, після чого реалізують нову стратегію. Реалізація спрямована на забезпечення ефективної роботи СОВК у межах приватних хмарних систем. Автори тестують стратегії з використанням функціонального та ручного тестування.

Постановка завдання. Метою статті є детальний опис методів тестування ефективності стратегій розподілення в СОВК, їх основних властивостей і способів аналізу результатів розподілення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для початку розглянемо тестування методом розподілення до першого відхилення. Процес розподілення проводиться доти, поки не буде відхилено запит на балансування наступного в динамічному ряді контейнера. Під відхиленням мається на увазі ситуація, коли стратегія розподілення не може помістити контейнер на якийсь із вузлів, оскільки у кластері просто немає вільного місця для контейнеру з такими вимогами. Якщо взяти один і той же динамічний ряд і стільки аналогічних екземплярів кластеру, скільки стратегія бере участь в експерименті, то можна перевірити, яка зі стратегій розподіляє ресурси краще в контексті цього методу. Експеримент складається із певної

кількості ітерацій для різних динамічних рядів. Одна ітерація експерименту закінчується тоді, коли для кожної стратегії та екземпляру кластеру буде відхилений контейнер.

Для опису алгоритму роботи методу розглянемо сутність кластеру. Кластер є композицією вузлів із можливістю застосування відповідної стратегії для балансування контейнера на одному з вузлів із такої композиції. Конкретна реалізація стратегії не є суттєвою в контексті цієї роботи, тому детально не розглядається. Розподілення інкапсульовано за викликом функції *Add* на екземплярі сутності кластеру. Розглянемо потенційно можливу структуру сутності кластеру з мінімальним функціоналом на діаграмі класів (рис. 1).

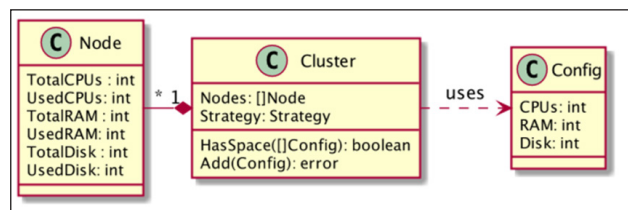


Рис. 1. Діаграма класів кластеру вузла та конфігурації контейнера

Кожна конфігурація описується такими вимогами, як кількість ядер центрального процесора (CPU), кількість оперативної пам'яті (RAM) та розмірність диску (Disk). Відповідно, вузли в кластері забезпечують ці вимоги.

Алгоритм однієї ітерації експерименту для розподілення до першого відхилення зображено на блок-схемі (рис. 2).

Основні метрики, які можна отримати шляхом проведення експерименту, називатимемо ключовими ідентифікаторами ефективності (далі – КІФ). Для цього методу КІФ можуть бути такими:

1. Кількість контейнерів, які вдалося розмістити в кластері до моменту першого відхилення (в межах однієї ітерації експерименту). Ця метрика дає змогу перевірити стабільність роботи стратегії. Наприклад, із використанням стратегії, яка може розподілити більше ресурсів до першого відхилення, можна динамічно додавати нові вузли до кластеру, причому кількість помилок буде мінімальною, відповідно, сервіс є стабільнішим.

2. Кількість випадків, коли з використанням однієї стратегії вдалося досягти кращого результату (в межах експерименту). Така метрика дозволяє перевірити, в якій кількості випадків одна стратегія поводить краще, ніж інша. Наприклад, із 10 000 ітерацій проведення експерименту в 8 000 з використанням першої стратегії вдалося розподілити більше контейнерів до

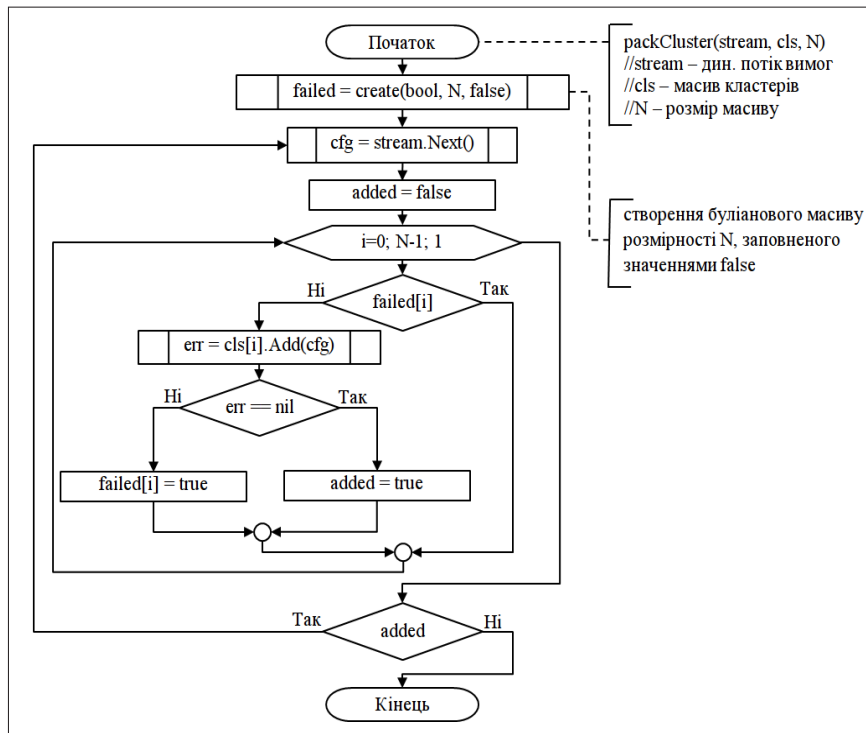


Рис. 2. Блок-схема роботи алгоритму розподілення до першого відхилення

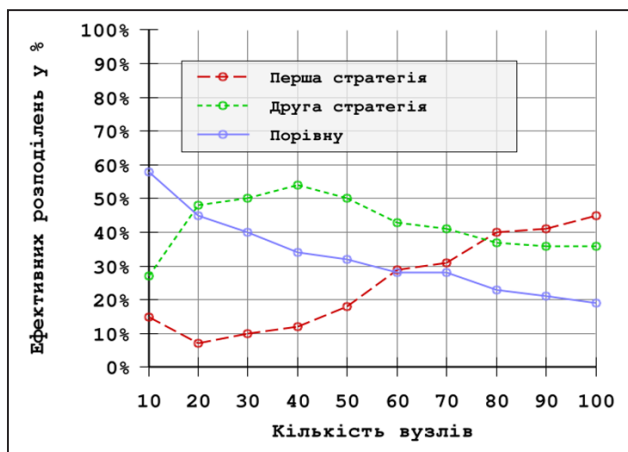


Рис. 3. Приклад градації ефективності двох стратегій розподілення

моменту першого відхилення, відповідно, це є 80% всіх випадків і є її стабільністю.

3. Кількість використаних ресурсів до моменту першого відхилення (в межах експерименту). Ця метрика показує ступінь повноти кластеру до моменту першого відхилення. Чим більше заповненим є кластер, тим ефективнішим буде розподілення.

Є сенс проводити експеримент із використанням різних структур кластеру й аналізувати отримані дані як результат багато-ітераційного повто-

рення експерименту на різних можливих вибірках. Для візуального представлення результатів можна використовувати різного роду графіки та діаграми. Одним із таких графіків може бути градація ефективності стратегії для кластерів різної розмірності (рис. 3).

Наступним розглянемо експеримент розподілення до повноти кластеру. Метод тестування полягає в тому, щоб запаковувати кластери доти, поки в кластері не буде місця хоча б для конфігурації з найменшими потребами. Як і в попередньому експерименті, використовувати одну й ту ж динамічну послідовність конфігурацій контейнерів. З використанням такого методу можна перевірити різні кількісні характеристики розподі-

лення. Детальний процес роботи експерименту зображено на блок-схемі (рис. 4).

Окрім функції *Add*, кластер тепер також повинен мати змогу перевірити, чи залишилося вільне місце для конфігурації, яка потенційно може бути повернута із динамічного потоку *HasSpace*. Також потрібно зазначити, що мінімальних конфігурацій контейнерів може бути декілька, оскільки конфігурація описується декількома можливими вимогами. Вектор конфігурації \vec{x} вважається меншим, ніж інший вектор \vec{y} тоді, коли кожний елемент першого вектора менший, ніж елемент другого вектора з тим же індексом $\vec{x} < \vec{y} \rightarrow \vec{x}_i < \vec{y}_i, i = \{1, \dots, N\}$, де N – це розмірність вектора вимог. Таким чином, якщо динамічний ряд формується на основі наступних векторів конфігурацій: (1, 5, 1); (1, 1, 5); (5, 5, 1), то мінімальними серед них є (1, 1, 5) та (1, 5, 1).

Як і для попереднього методу, опишемо потенційні КІФ, які можна використати для перевірки ефективності розподілення:

1. Кількість контейнерів, яку вдалося розподілити до моменту повного заповнення кластеру (в межах однієї ітерації експерименту). Ця метрика показує стан кластеру за умови максимально повного використання його ресурсів. Мається на увазі, що без зупинки якогось із контейнерів або ж додавання нового вузла жодний із контейнерів послідовності не може бути розподілений.

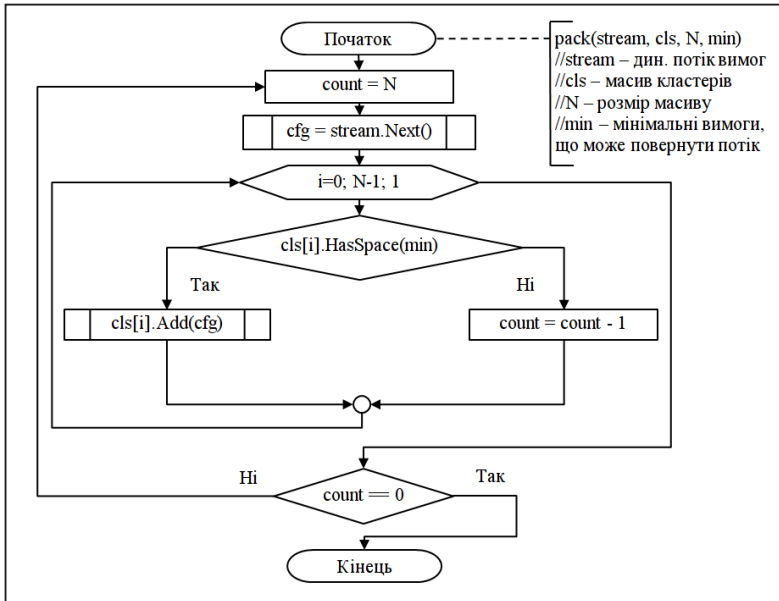


Рис. 4. Блок-схема роботи алгоритму розподілення до повноти кластеру

2. Кількість контейнерів, які були відхилені в процесі заповнення кластеру (в межах однієї ітерації експерименту). Менша кількість відхилених контейнерів до моменту повного заповнення дає змогу оцінити рівень стабільності системи.

3. Кількість відхилених і вдало розподілених контейнерів (у межах експерименту). Дає змогу зрозуміти, яка зі стратегій є більш ефективною для різного набору вузлів і динамічних рядів.

4. Для числового виміру того, чи є придатною структура кластеру для використання з даними в динамічному ряді, можна підрахувати коефіцієнт ефективності стратегії за формулою:

$$\frac{S}{N} \cdot \frac{\sum_{i=1}^M \bar{U}_i}{M},$$

де S – кількість вдало упакованих контейнерів;

N – загальна кількість контейнерів, що були оброблені до моменту повної упаковки;

\bar{U} – вектор кількості використаних ресурсів у кластері;

\bar{T} – вектор загальної кількості ресурсів у кластері;

M – кількість типів ресурсів у кластері (розмірність векторів \bar{U} та \bar{T}).

Так, наприклад, якщо із 300 контейнерів 280 було успішно запаковано та вектори $\bar{U} = (8,34,180)$, $\bar{T} = (10,40,200)$, тоді значення коефіцієнта ефективності дорівнюватиме

$0,93 \cdot 0,9 = 0,837$. Таким чином, значення коефіцієнта зменшиться, якщо кількість вільних ресурсів збільшиться або ж зменшиться кількість вдало запакованих контейнерів щодо відхилених.

Як і в попередньому випадку, цей метод є сенс проводити для різної конфігурації кластеру, зокрема набору вузлів. Для візуального представлення результатів зручно використати гістограму (рис. 5).

Висновки. Для перевірки ефективності роботи стратегій розподілення можна використовувати різні методи та метрики. Залежно від мети цільової системи та критеріїв оцінки ефективності можна

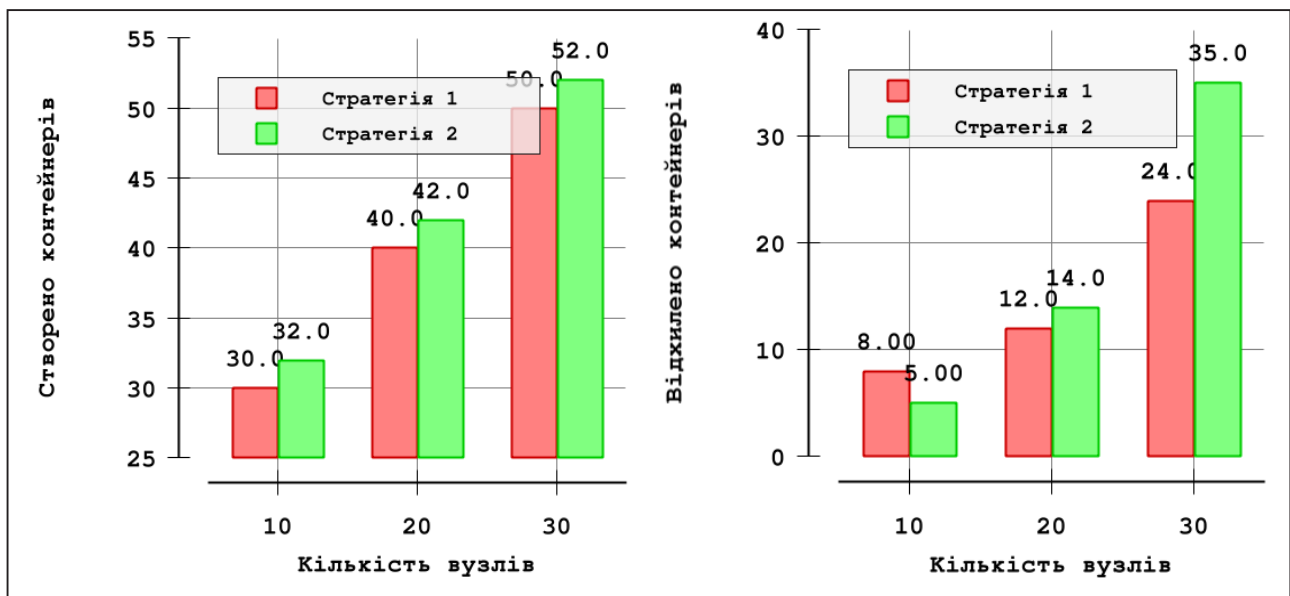


Рис. 5. Приклад гістограми кількісних характеристик результату розподілення до повноти

обирати різні стратегії розподілення і структури кластеру. У нашій роботі розглядаються методи тестування розподілення до першого відхилення та метод тестування упаковки до повноти кластеру, а також описуються алгоритми їхньої роботи у вигляді блок-схем.

Для кожного із методів розглядаються КІФ, які дають змогу зрозуміти, чи є стратегія придатною в конкретному випадку. Так, наприклад, на основі інформації про кількість відхилених контейнерів у процесі розподілення до повноти кластеру та кількості запакованих контейнерів до першого відхилення можна зробити висновок про стабіль-

ність системи. Або ж, наприклад, після проведення експерименту заповнення до повноти кластеру можна використати формулу для обрахунку коефіцієнта ефективності, що показує наскільки в межах від $[0, 1]$ структура кластеру, динамічна послідовність і стратегія розподілення є сумісними та можуть бути ефективно використані.

Робота є суттєвою для проведення подальшого дослідження потенційних способів покращення роботи наявних стратегій розподілення та створення методів для оптимізації топологій кластерів. Окремого дослідження заслуговує тема тестування відмовостійкості системи.

Список літератури:

1. Таненбаум Э., Стеен М. Распределенные системы: принципы и парадигмы. Санкт-Петербург, 2003. 877 с.
2. Воеводін Є.В. Проблеми сучасних методів розподілення динамічної послідовності ресурсів у системах оркестрування віртуальних контейнерів. Науковий журнал «Альманах науки». 2017. № 4. С. 54–58.
3. Воеводін Є.В. Використання самоорганізаційних карт Кохонена для балансування динамічної послідовності ресурсів у системах оркестрування віртуальних контейнерів. Науковий журнал «Альманах науки». 2017. № 5. С. 45–50.
4. Воеводін Є.В., Авраменко В.С. Порівняння ефективності топологій самоорганізаційних карт Кохонена в системах оркестрування віртуальних контейнерів. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки». 2018. № 1. С. 99–105.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. Москва, 2006. 1104 с.
6. Cerin C., Menouer T., Saad W., BenAbdallah W. A New Docker Swarm Scheduling Strategy. URL: <https://lipn.univ-paris13.fr/~menouer/SC217.pdf>.

МЕТОДЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРАТЕГИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ В СИСТЕМАХ ОРКЕСТРАЦИИ ВИРТУАЛЬНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ

В статье описываются методы тестирования стратегий распределения в изолированной среде с имитацией нагрузки. Поскольку каждая стратегия решает конкретную проблему в доменной области, то критерии для их тестирования и подходы являются совершенно разными. Сначала рассматривается структуру системы, в контексте которой проводится тестирование и описываются методы, также дается определение стратегии распределения и кратко описываются стандартные решения. Первым рассматривается метод распределения к первому отклонению. Такой подход помогает понять, какая из стратегий дает возможность распределить больше контейнеров без единой ошибки. Вторым методом является распределения до полноты кластера. В отличие от первого метода, он позволяет проанализировать количество отклоненных и удачно упакованных контейнеров до того момента, пока в кластере не будет места для минимально возможной по размеру конфигурации. Кроме методов тестирования, также рассматриваются и способы анализа и визуализации данных, полученные в результате многократного проведения экспериментов.

Ключевые слова: распределение, методы тестирования, системное тестирование, виртуализация, контейнер, система оркестрации.

METHODS TO TEST EFFICIENCY OF BALANCING STRATEGIES IN VIRTUAL CONTAINERS ORCHESTRATION SYSTEMS

The paper covers methods for testing balancing strategies in isolated environment with synthetic traffic imitation. Every existing strategy is used to solve specific distribution problem in the domain area. Thus the criteria to test those strategies are completely different. At the beginning article describes the structure of the orchestration system and its main responsibilities. Then the proper definition of the balancing strategy is given with the examples of common solutions used by orchestration systems to distribute resources. The first described method is distribution until first request rejection. This method allows analyzing which strategy can distribute more containers without making a single mistake, which influences the overall stability of the orchestration system. Another described method is distribution until cluster is completely full. Unlike the previously described method this one allows to measure the amount of rejected and created containers during the whole flow, until there is no place for minimal possible container configuration. Apart from efficiency testing, the paper also lists some of the approaches to analyze and visualize results received from the intensive strategies testing.

Key words: distribution, testing methods, system testing, virtualization, container, orchestration system.

UDC 681.3.093:044.3

Dos E.V.

DevOps EPAM

Zuev D.O.

International IT Expert, Independent Consultant

Kropachev A.V.

Bell Integrator

Babkin O.V.

Bell Integrator

MODELING AND MONITORING OF INFORMATION SYSTEM INFRASTRUCTURE

Development of power and temperature monitoring system is a key aspect of ensuring of data centers performance. It is important to build accurate model of the scalable server room power consumption system and cost-effective cooling facility. Systematic analysis demonstrates that the servers' power consumption is always correlated with key workload parameters of shared storage, memory, computational capability and network bandwidth. It was considered that for management of temporal and spatial temperature variations of servers' stability it is necessary to develop accurate temperature map modeling algorithm. It was shown that computational fluid dynamics simulation is most effective instrument of analysis while it uses mathematical methods for development of precise fluid flow model. Though, it was proved to be a very complex model because it based on differential equation with no analytical solution so resource-intensive numerical procedures have to be used in this case. It was proposed to use algorithm which allows decreasing complexity of computational fluid dynamics simulation and building accurate temperature map.

Key words: data center, temperature map, power consumption, cooling facility, servers' room, computational fluid dynamics simulation, RC network.

Introduction. Modern scalable data centers platforms performance is one of the most important task of IT-area development. Building of power and temperature facilities models is proved to be effective instrument of data centers servers' room stability ensuring. Assigned task could be solved by development of mathematical model of server room power consumption system.

To identify the main aspects of the problem, systematic analysis of recent studies and publications was done. There were analyzed aspects high-level power data center servers' models to estimate key workload parameters [1–3]. To solve problem of electrical cooling complex organization based on fan's system works [4; 14] which demonstrate that the system sets significant amount of data center infrastructure power utilization were studied. Computational fluid dynamics simulation as effective instrument of development of servers' thermal map [5; 14] was analyzed; as well

as methods which allows decreasing complexity of this simulation [6–8]. Comparative analysis of cooling power as varying processor utilization process which leads to adjusting the server room temperature change [10–14] was also considered. Systematic analysis shows possibility to develop effective model based on heat recirculation scheme of datacenter platform.

Data center power system modeling. Development of efficient power and temperature monitoring system is a key aspect of ensuring of datacenters performance. It is necessary to build accurate model of the data center server room power consumption and cooling facility and then work on scalable and cost-effective power with temperature monitoring systems.

Most accurate power models usually simulate and analyze individual components of servers, but for large-scale data centers these algorithms would be resource-intensive and speed of such a simulation

proves to be low enough. Thereby our goal is to simulate the large clusters of servers in datacenters' infrastructure network (Figure 1).

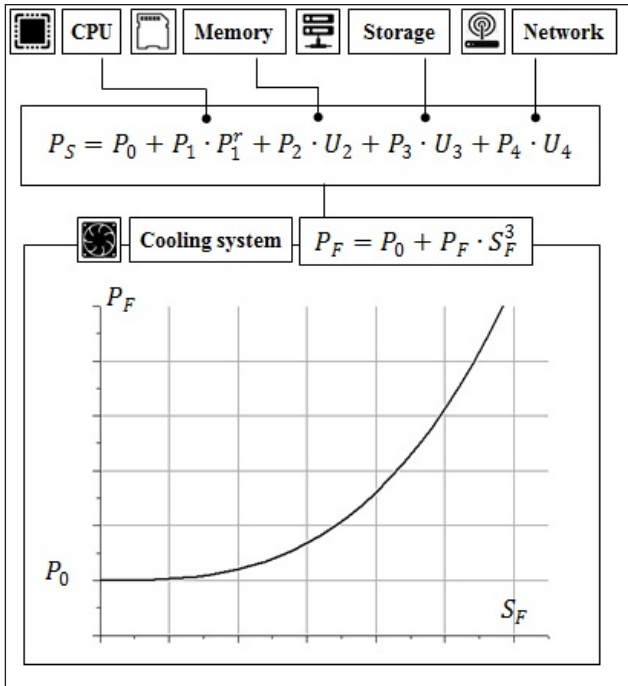


Fig. 1. Data center power system modeling scheme

It was demonstrated [1–3], that power models are widely used to monitor and estimate the power consumption of servers, analysis shows that the power consumption for a given server is always correlated with key workload parameters: shared storage, memory (RAM and cash-memory), computational capability (CPU) and network bandwidth (Figure 1).

To estimate this connection various experimental studies of high-level power data center servers' models were to be done [1–3]. Basically model should use simplified simulation equation of linear or nonlinear regression power model which estimates the server power consumption up to service resource occupancy level:

$$\begin{cases} P_S = P_0 + \sum_i P_i \cdot U_i^{r_i} \\ r_i \geq 1; U_i \in [0..100\%] \end{cases} \quad (1),$$

where P_S is server power consumption, U_i is physical resources utilization level and P_i is a set of fitting parameters, which varies according to the physical resource's type of analyzed data center server system.

Evaluations for developing the high-level server power model could be conducted by comparing different forms of power models which refers to different values of i and r_i . Most simplified model one could set $i=1$ and analyzes only computational capability of data center's servers ($r_i = 1$ is used for

linear model and $r_i > 1$ is for nonlinear one). For accurate simulation it is better to set $i=1$ and analyze all servers' physical resources occupancy (CPU, RAM and storage workload intensity, as well as network bandwidth).

Electrical cooling complex based of fan's system stands significant amount of data center infrastructure power utilization. Fan power consumption has a cubic relationship with fan speed [4], as follows:

$$P_F = P_0 + P_F \cdot S_F^3 \quad (2),$$

where P_0 and P_F are fitting parameters and S_F is a fan speed. Thus, lowering of the fan speed lets us to significantly reduce power consumption (Figure 1).

Data center temperature control system modeling. To manage temporal and spatial temperature variations stability it is necessary to develop accurate temperature model. It allows to significantly save expenses on placing of thermal sensors a high area data center server room and prevent problems caused by its' frequent failures. Computational fluid dynamics (CFD) simulation is proved to be effective instrument of development of servers' thermal map. It uses mathematical methods and algorithms for precise analysis of fluid flow model. CFD-based thermal modeling [5] is based following equation:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\nabla\rho\varphi)}{\partial x\partial y\partial z} = \frac{\partial(\frac{D \cdot \partial\varphi}{\partial x\partial y\partial z})}{\partial x\partial y\partial z} + S(\varphi), \quad (3)$$

where ρ is a air fluid density, x, y, z are coordinates, \vec{V} is velocity for each of x, y, z direction, S is the source for each φ variable and φ is a variable that can be used for following properties:

- mass;
- velocity;
- temperature;
- turbulence.

D is the diffusion coefficient which could be estimated as

$$D = \frac{A \cdot T^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2}}}{\Omega \cdot \rho_A \sigma} \quad (4),$$

where A is coefficient, M_N are molar masses of molecules in the gaseous mixture, T is the absolute temperature, ρ_A is the pressure, σ is the average collision diameter, Ω is a temperature-dependent collision integral.

It should be noticed that four components in Eq. (3) refers to main parts of air fluid transport process model:

- transient: $\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t}$;

- convection: $\frac{\partial(\bar{V}\rho\varphi)}{\partial x\partial y\partial z}$;
- diffusion: $\frac{\partial(D\cdot\frac{\partial\varphi}{\partial x\partial y\partial z})}{\partial x\partial y\partial z}$;
- source: $S(\varphi)$.

CFD-simulation shows high accuracy, but this kind of simulation is a very complex one because there is no analytical solution for differential equation so it has to be solved by numerical procedures which prove to be resource-intensive.

At this study is presented solution based on the works [6; 8; 14] which allows to decrease complexity of CFD-simulation and build accurate temperature map. The algorithm is based on building of heat- and air-flow graphs. Simplified temperature model for servers is oriented on the CPU- and RAM-blocks of servers, as well as on heat removal capability referring to the fan speed changes. Model includes building of thermal RC network scheme of the system (Figure 2) based on connection between thermal and electrical losses [7].

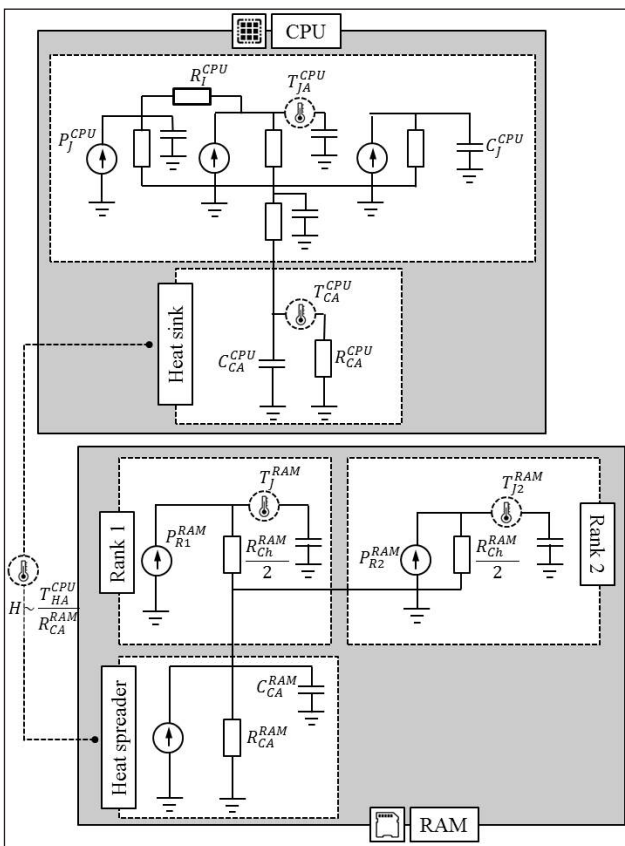


Fig. 2. RC network based temperature model which includes CPU and memory sockets

Figure 2 demonstrates that CPU socket RC network scheme includes:

- power consumption of each core in a socket P_j^{CPU} ;

- lateral thermal resistance R_l^{CPU} ;
- vertical thermal resistance R_v^{CPU} ;
- thermal resistance of heat spreader R_s^{CPU} ;
- case-to-ambient thermal resistance of heat sink R_{CA}^{CPU} ;
- thermal capacitances of die C_J^{CPU} ;
- thermal capacitances of heat spreader C_S^{CPU} ;
- thermal capacitances of heat sink C_{CA}^{CPU} ;
- junction temperature T_{JA}^{CPU} .

It has to be noticed that R_v^{CPU} is usually neglected while $R_v^{CPU} \ll R_l^{CPU}$ and R_{CA}^{CPU} could be obtained as a sum of the thermal resistances of heat sink R_{HS}^{CPU} and convective resistance R_{Conv}^{CPU} as function of the fan speed S_F

$$\begin{cases} R_{CA}^{CPU} = R_{HS}^{CPU} + R_{Conv}^{CPU}(S_F) \\ R_{Conv}^{CPU} \sim (EA \cdot S_F^\alpha)^{-1} \\ \alpha \in [80..100\%] \end{cases} \quad (5)$$

where R_{Conv}^{CPU} estimation is based on parameters of effective area EA and factor α .

In other hand, memory socket RC network scheme also includes further components and definitions (Figure 2):

- power consumption of each RAM chip P_{Ch}^{RAM} ;
- thermal resistance of each RAM chip R_{Ch}^{RAM} ;
- thermal capacitance of each RAM chip C_{Ch}^{RAM} ;
- junction temperature of each RAM chip T_{Ch}^{RAM} ;
- thermal resistance of the case to ambient of the memory R_{CA}^{RAM} ;
- number of ranks of each RAM chip N .

Temperature of memory socket is correlated with the temperature of CPU socket due to air flows inside a server. Thereby, air absorbing heat in CPU socket affects to the temperature of RAM socket as it is equivalent to raising temperature at memory socket. Thermal coupling should be modeled as follows:

$$H \sim \frac{T_{HA}^{CPU}}{R_{CA}^{RAM}} \quad (6)$$

where H is the dependent coupling heat source of the memory; T_{HA}^{CPU} is CPU heat sink temperature, of the CPU.

Data center computing facility and cooling facility modeling. For precise estimation of data center servers temperature map, it is necessary to analyze account interactions of multiple servers' heat and hot air flows from bottom to top of the servers room. This procedure allows to develop heat recirculation scheme of datacenter. The model of recirculation can be built by a cross-interference matrix represented by

$$\varphi_{N \times N} : \begin{bmatrix} \varphi_{1-1} & \cdots & \varphi_{1-N} \\ \cdots & \varphi_{i-j} & \cdots \\ \varphi_{1-j} & \cdots & \varphi_{N-N} \end{bmatrix} \quad (7),$$

where φ_{i-j} parameter refers to the outlet heat rate of the i -th server in the inlet heat rate of the j -th server of data center, N is the number of servers in a servers room.

Let us suppose that H_i^{out} is outlet heat of i -th server and H_j^{in} is inlet heat of j -th server. H_j^{in} can be calculated on server room environment heat H_{env} , power consumed by j -th server and H_i^{out} value (Figure 3):

$$H_j^{in} = \sum_{i=1}^N H_i^{out} \cdot \varphi_{i-j} + H_{env} + P_j. \quad (8),$$

Heat rate allows estimating the temperature at each server within a serverroom by temperature map models described at previous chapter.

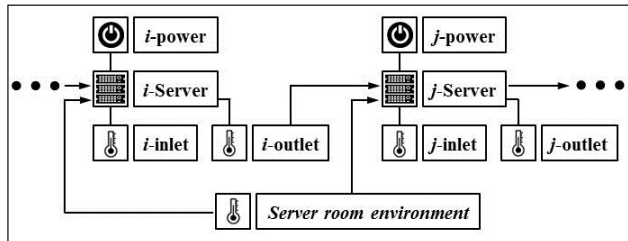


Fig. 3. Scheme of estimation of data center server temperature level

Cooling facility model usually includes following functional components:

- cooling tower;
- chiller;
- server room air conditioning (SRAC);
- server room air handling (SRAH).

Thereby, the heat generated by data center’s servers is absorbed by SRAC conditioned air provided from CRAH, and then it has to be drawn by SRAH system. SRAH exchanges the heat with cold air (or water) provided from a chiller based on refrigeration cycle. Comparative analysis of cooling power should be provided as varying processor utilization process which leads to adjusting the server room temperature change [10–14].

Up to this model power usage effectiveness (PUE) as a comparison of total power utilized by data center and power utilized by servers can be evaluated on server temperature set-point (Figure 4) which depends on CRAH efficiency [13; 14]:

$$E_{CRAH} = \frac{T_{SRAH}^{air} - T_{room}}{T_{SRAH}^{air} - T_{SRAH}^{water}} \quad (9),$$

where T_{SRAH}^{air} refers to the temperatures of air exhausted from server room and T_{SRAH}^{water} is the temperature of chilled water flowing into the SRAH.

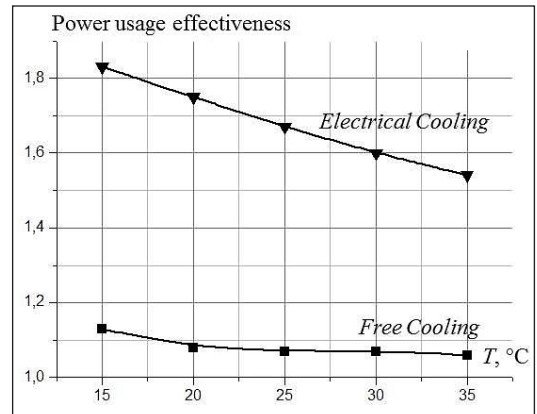


Fig. 4. Power usage effectiveness of data center server room in electrical and free cooling

Therefore, those parameters can be calculated by server power consumption, outside temperature estimation. While $E_{CRAH} < 1$ it should be noticed T_{room} has to be always higher than T_{SRAH}^{water} .

Conclusions. It was shown that development of power and temperature monitoring system is a key aspect of ensuring of data centers performance. Thereby it is important to build accurate model of the scalable server room power consumption system and cost-effective cooling facility. Analysis demonstrates that the servers’ power consumption is always correlated with key workload parameters of shared storage, memory, computational capability and network bandwidth.

It was considered that for management of temporal and spatial temperature variations of servers’ stability it is necessary to develop accurate temperature map simulation algorithm. Computational fluid dynamics simulation is proved to be effective instrument of analysis while it uses mathematical methods for development of precise fluid flow model. Though, it is a very complex model because it based on differential equation with no analytical solution so resource-intensive numerical procedures have to be used in this case. It was proposed to use algorithm which allows decreasing complexity of computational fluid dynamics simulation and building accurate temperature map. The algorithm is based on building of heat- and air-flow graphs. Simplified temperature model for servers is oriented on the computational and memory-sockets of servers, as well as on heat removal capability referring to the fan speed changes. Model includes building of thermal RC network scheme of the system which is based on connection between thermal and electrical losses

Cooling facility model included cooling tower, chiller, server room air conditioning and server room air handling. It was mentioned that for estimation of data center servers temperature map, it is necessary

to analyze account interactions of multiple servers' heat and air flows within the bounds of the server's room. This procedure allowed developing precise heat recirculation scheme of data center.

References:

1. Kralicek E. Physical vs. Virtual Server Environments. The Accidental SysAdmin Handbook. 2016. P. 121–134.
2. Rivoire S., Ranganathan P., Kozyrakis C. A Comparison of High-Level Full-System Power Models. Hot Power. 2008. № 8 (2). P. 32–39.
3. Pedram M., Hwang I. Power and performance modeling in a virtualized server system. Parallel Processing Workshops (ICPPW), 39th International Conference on. 2010, September. P. 520–526.
4. Megdiche M. Dependability Engineering for Data Center Infrastructures. Data Center Handbook. 2014. P. 275–305. DOI: 10.1002/9781118937563.ch15.
5. Choi J., Kim Y., Sivasubramaniam A., Srebric J., Wang Q., Lee J. A CFD-based tool for studying temperature in rack-mounted servers. IEEE transactions on computers. 2008. № 57 (8). P. 1129–1142.
6. Heath T., Centeno A.P., George P., Ramos L., Jaluria Y., Bianchini R. (2006, October). Mercury and freon: temperature emulation and management for server systems. In ACM SIGARCH Computer Architecture News. 2006. Vol. 34. № 5. P. 106–116.
7. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems publication information. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. 2013. № 21 (2).
8. Ayoub R., Nath R., Rosing T. JETC: Joint energy thermal and cooling management for memory and CPU subsystems in servers. High Performance Computer Architecture (HPCA), IEEE 18th International Symposium on. 2012, February. P. 1–12.
9. Pakbaznia E., Pedram M. Minimizing datacenter cooling and server power costs. Proceedings of the 2009 ACM/IEEE international symposium on Low power electronics and design. 2009, August. P. 145–150.
10. Hwang D.C., Manno V.P., Hodes M., Chan G.J. Energy savings achievable through liquid cooling. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm). 12th IEEE Intersociety Conference on. 2010, June. P. 1–9.
11. Breen T.J., Walsh E.J., Punch J., Shah A.J., Bash C.E. From chip to cooling tower datacenter modeling: Part I influence of server inlet temperature and temperature rise across cabinet. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 12th IEEE Intersociety Conference on. 2010, June. P. 1–10.
12. Gao T., Samadiani E., Schmidt R., Sammakia B. Dynamic analysis of hybrid cooling datacenters subjects to the failure of CRAC units. ASME International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems. 2013, July. P. V002T09A015–V002T09A015.
13. Kim J., Ruggiero M., Atienza D. Free cooling-aware dynamic power management for green datacenters. High Performance Computing and Simulation (HPCS), International Conference on. 2012, July. P. 140–146.
14. Kim J., Sabry M.M., Ruggiero M., Atienza D. Power-Thermal Modeling and Control of Energy-Efficient Servers and Datacenters. Handbook on DataCenters. New York, 2015. P. 857–913.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА МОНІТОРИНГ ІНФРАСТРУКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Розробка системи контролю потужності та температури є ключовим аспектом забезпечення ефективності роботи центрів обробки даних. Важливо побудувати точну модель масштабованої серверної системи енергоспоживання й економічного охолодження. Систематичний аналіз демонструє, що енергоспоживання серверів завжди корелює з ключовими параметрами робочого навантаження для загального інформаційного сховища, пам'яті, обчислювальних потужностей і мережевої інфраструктури. Показано, що для управління температурними змінами, які впливають на стабільність роботи серверів, необхідно розробити точний алгоритм моделювання температурних карт. Було показано, що моделювання динаміки потоку є найбільш ефективним інструментом аналізу, оскільки використовуються точні математичні методи. Проте практика продемонструвала, що така модель є надто складною, адже вона заснована на диференціальних рівняннях, для яких не існує аналітичного рішення, тому необхідно використовувати ресурсомісткі чисельні методи. Було запропоновано розробити алгоритм, який дозволяє зменшити складність моделювання і побудувати точну карту температур.

Ключові слова: центр обробки даних, карта температур, енергоспоживання, система охолодження, серверний зал, моделювання динаміки потоку, РС-контур.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И МОНИТОРИНГ ИНФРАСТРУКТУРЫ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Разработка системы контроля мощности и температуры является ключевым аспектом обеспечения эффективности работы центров обработки данных. Важно построить точную модель масштабируемой серверной системы энергопотребления и экономичного охлаждения. Систематический анализ демонстрирует, что энергопотребление серверов всегда коррелирует с ключевыми параметрами рабочей нагрузки для общего хранилища, памяти, вычислительных мощностей и сетевой инфраструктуры. Показано, что для управления температурными изменениями, которые влияют на стабильность работы серверов, необходимо разработать точный алгоритм моделирования температурных карт. Было показано, что моделирование динамики потока является наиболее эффективным инструментом анализа, поскольку используются точные математические методы. Тем не менее, практика продемонстрировала, что данная модель является чрезмерно сложной, поскольку основана на дифференциальных уравнениях, для которых не существует аналитического решения, поэтому необходимо использовать ресурсоемкие численные методы. Было предложено разработать алгоритм, который позволяет уменьшить сложность моделирования и построить точную карту температур.

Ключевые слова: центр обработки данных, карта температур, энергопотребление, охлаждающая установка, серверный зал, моделирование динамики потока, РС-контур.

УДК 681.51

Ермаков И.А.

Одесский национальный политехнический университет

Ложечников В.Ф.

Одесский национальный политехнический университет

ИНВАРИАНТНАЯ СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ В УСТАНОВКЕ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПАРА ДЛЯ ЭНЕРГОБЛОКА 1000 МВт АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Производство пара на атомных электростанциях с ВВЭР-1000 осуществляется в специальных теплообменных установках – парогенераторах. Показана актуальность применения инвариантной системы автоматического регулирования в парогенераторах. Как альтернатива классической трёхимпульсной, имеющейся на эксплуатации на энергоблоках ВВЭР-1000, для регулирования уровня предложена инвариантная система автоматического регулирования, которая значительно повышает качество регулирования уровня, а также надёжность процесса регулирования.

Ключевые слова: инвариантная система регулирования, трёхимпульсная система регулирования, автоматизация, модель динамики.

Постановка проблемы. На энергоблоках атомных электростанций (далее – АЭС) с ВВЭР-1000 для поддержания уровня пароводяной смеси в парогенераторах используется трёхимпульсные автоматические системы управления с аналоговыми регуляторами. В этих системах на вход регулятора, кроме основного сигнала по уровню воды, поступают также сигналы по расходу пара и питательной воды. Расчёт указанной системы обоснован положением классической теории автоматического управления (схема регулирования с контуром инвариантности по основному возмущающему воздействию), и для их параметризации используются инженерные методы определения настроек регулятора.

Анализ последних исследований и публикаций. Инвариантная система автоматического регулирования при плановом изменении нагрузки, структура которой выбирается на основе использования метода структурно-параметрической оптимизации динамических систем [5, с. 70–71]. В этой публикации передаточную функцию устройства компенсации находят из условия инвариантности основной регулируемой величины по отношению к крайнему внешнему возмущению с учетом заданной передаточной функции системы по основной регулируемой величине.

Постановка задания. Классическая трёхимпульсная система стабилизации уровня не обеспечивает полной инвариантности от приведен-

ных возмущений. Но при принятых режимных значениях работы парогенератора инвариантную систему разработать невозможно, однако, если несколько изменить температуру и давление питательной воды, такая технология становится возможной.

Изложение основного материала исследования. Производство пара на АЭС с ВВЭР-1000 осуществляется в специальных теплообменных установках – парогенераторах (далее – ПГ). В ПГ осуществляется передача тепла, которая отводится от активной зоны реактора охлаждающей средой (теплоносителем 1 контура) до котельной воды 2 контура. Котельная вода ПГ, омывая теплообменные трубки, нагревается, вскипает и превращается в насыщенный пар. Рабочий пар из ПГ по паропроводу движется в паровую турбину, в проточной части которой тепло преобразуется в механическую энергию ротора турбины. ПГ, вместе с реактором, главным циркуляционным насосом и турбогенератором, относится к основному оборудованию АЭС. Управление питанием в каждом из ПГ сводится к поддержке материального баланса между отводом пара, продувкой и подачей питательной воды. Параметром, характеризующим материальный баланс, является уровень воды в ПГ [1, с. 50].

К стабилизации уровня предъявляются достаточно жесткие требования. Для ПГ с ВВЭР-1000 номинальный уровень $L_{ном}$ составляет 2 450 мм.

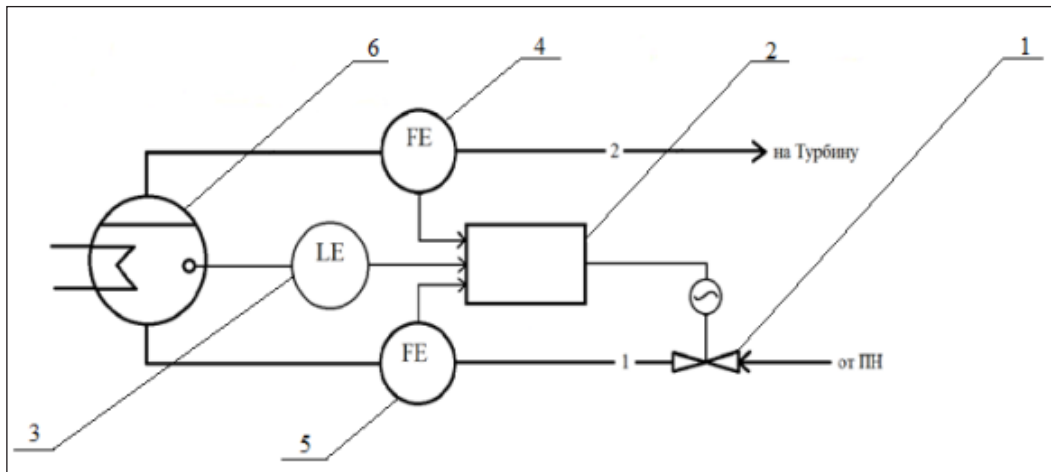


Рис. 1. Трёхимпульсная схема регулирования уровня воды в ПГ:
 1 – исполнительный механизм питательного клапана; 2 – регулятор;
 3 – сигнализатор по уровню; 4 – сигнализатор по расходу пара;
 5 – сигнализатор по расходу воды; 6 – парогенератор

Точность поддержания уровня в статических режимах составляет ± 50 мм от $L_{\text{ном}}$, в динамике ± 150 мм от $L_{\text{ном}}$ (с учетом нечувствительности регулятора). Повышение уровня воды не допускается из-за затопления и нарушения работы устройств (попадание воды в турбину), а снижение уровня – из-за обнажения поверхности нагрева.

Возмущающими воздействиями на уровень являются:

- расход пара (нагрузки);
- изменение расхода питательной воды и продувки;
- изменение температуры питательной воды;
- изменение тепловода со стороны первого контура (изменение средней температуры первого контура или отключения ГЦН).

При возмущении расходом пара или отключении ГЦН проявляется явно выраженное «набухания» уровня, то есть изменение его в начальные моменты времени в сторону, которая не соответствует знаку возмущающего воздействия. Явление «набухания» можно объяснить так. При изменении расхода пара, например, увеличении, давление в ПГ уменьшается, происходит дополнительное вскипание воды, увеличение уровня. В дальнейшем уровень начинает падать, так как расход пара увеличился, а расход питательной воды остался прежним. При отключении ГЦН теплоподвод в ПГ резко уменьшается, интенсивность кипения и объем пузырьков пара уменьшаются, что приводит к снижению уровня. Однако уменьшение парообразования приводит к снижению давления и некоторого увеличения парообразования. Однако

первый фактор существенный, расход питательной воды остался неизменным [5, с. 53].

На рис. 1 изображена трехимпульсная схема регулирования уровня воды. В данной схеме исполнительный механизм питательного клапана управляется регулятором, на вход которого подаются сигналы по уровню, расходу пара и расходу воды. Использование трехимпульсной автоматической системы регулирования (далее – АСР) уровня воды в ПГ с ПИ-регулятором позволяет с импульсами по расходу питательной воды и пара регулировать объект с эффектом «набухания».

Динамические свойства ПГ являются неблагоприятными с точки зрения стабилизации уровня воды. Этим объясняется тот факт, что для автоматического регулирования уровня не пригодны обычные одноконтурные системы регулирования.

Принцип работы классической 3-импульсной АСР (рис. 1) следующий. Сигналы по расходу пара и питательной воды вводятся в регулятор с противоположными знаками. В установленном состоянии эти сигналы равны, противоположные по знаку и, следовательно, компенсируют друг друга.

Сигнал по уровню воды в ПГ компенсируется сигналом задания. При изменении расхода пара мгновенно меняется соответствующий сигнал на входе в регулятор, и последний пропорционально изменяет расход питательной воды, не дожидаясь изменения уровня.

Таким образом, возможно подавление скачкообразных возмущений расходом пара величиной до 18 кг/с без выхода уровня из пятидесятимил-

лиметровой зоны. При всем этом получаем аperiodический переходный процесс регулирования.

Передаточная функция ПГ описывается как сумма четырёх параллельно соединенных блоков, учитывающих динамические свойства ПГ.

Таким образом, математическая модель объекта для классической трёхимпульсной системы примет вид:

– по каналу «Расход питательной воды – уровень»:

$$W(s)_{\Delta M_{ПВ}} = \frac{1}{s} \cdot \frac{-8.7 \cdot 10^3 \cdot s + 100}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (1);$$

– по каналу «Расход пара – уровень»:

$$W(s)_{\Delta MD} = \frac{1}{s} \cdot \frac{7.1 \cdot 10^3 \cdot s - 100.3}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (2);$$

– по каналу «Температура питательной воды – уровень»:

$$W(s)_{\Delta MD} = \frac{1}{s} \cdot \frac{15 \cdot 10^6 \cdot s - 142 \cdot 10^3}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (3);$$

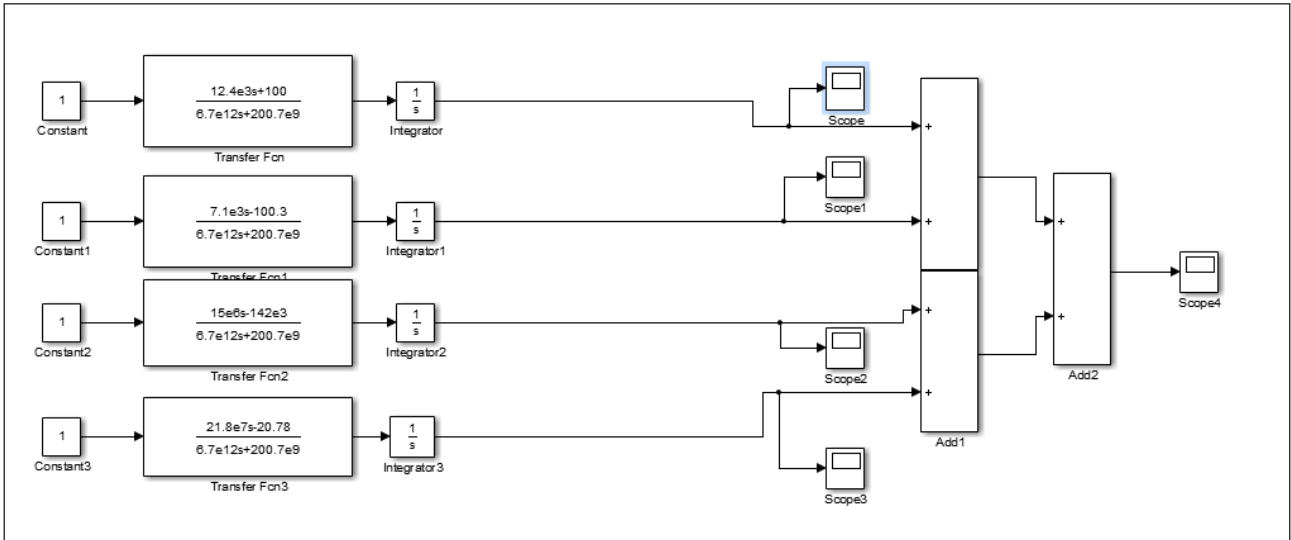


Рис. 2. Структурная схема исследования кривых разгона объекта управления

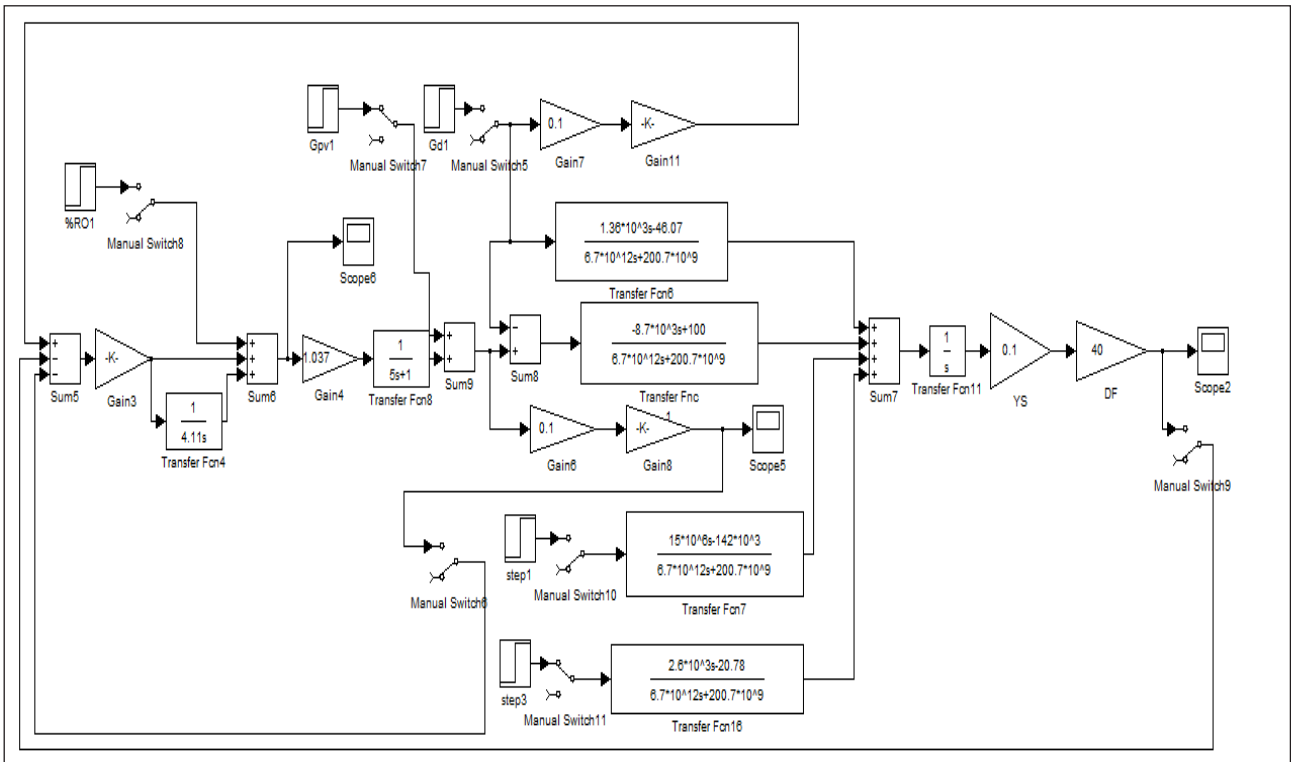


Рис. 3. Модель классической трёхимпульсной АСР уровня воды в ПГ

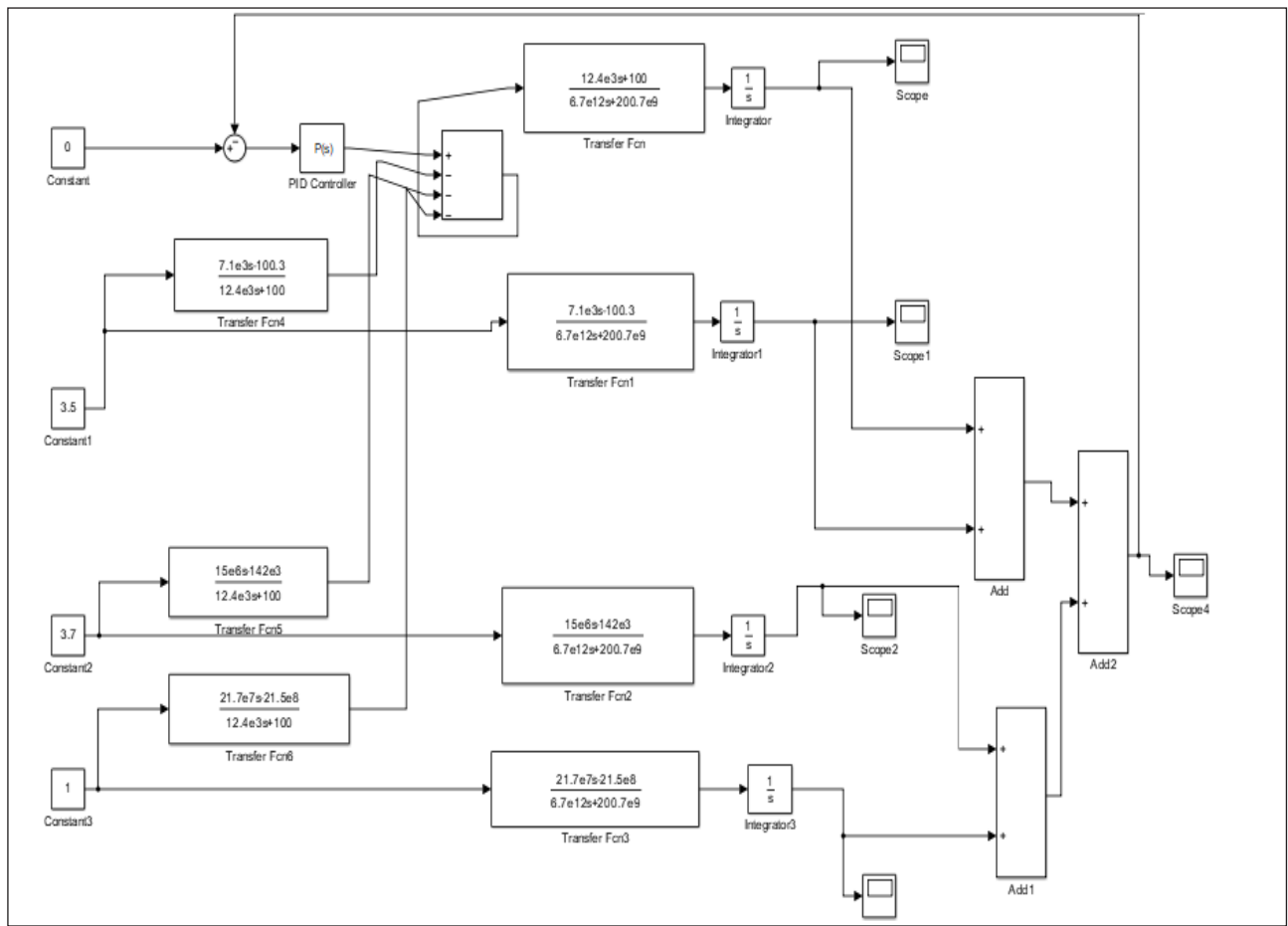


Рис. 4. Модель инвариантной АСР уровня воды в ПГ

– по каналу «Тепловосприятие экранов – уровень»:

$$W(s)_{\Delta M \Delta T} = \frac{1}{s} \cdot \frac{21.8 \cdot 10^8 \cdot s - 17.5 \cdot 10^5}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (4).$$

С учетом рассчитанных численных значений параметров передаточных функций элементов АСР построено структурную схему исследования кривых разгона в Simulink, представленную на рис. 2. Модель классической трёхимпульсной АСР уровня воды в ПГ представлена на рис. 3.

Поскольку математическая модель трёхимпульсной системы управления по каналу «отклонение расхода питательной воды – отклонение уровня» содержит знак «-» в числителе передаточной функции, то инвариантную систему разработать невозможно. Однако можно заметить, что, если поднять температуру питательной воды с 220°C до 280°C, то коэффициенты числителя станут положительными, и тогда имеет место разработка инвариантной системы управления. Это технически возможно выполнить – такая температура меньше, чем температура воды первого кон-

тура, а для того, чтобы вода не закипела, следует поднять давление воды с 6,4 МПа до 7,0 МПа, что позволяет турбонасос ПВД.

Таким образом, математическая модель объекта для разработки инвариантной системы примет вид:

– по каналу «Расход питательной воды – уровень»:

$$W(s)_{\Delta M_{ПВ}} = \frac{1}{s} \cdot \frac{12.4 \cdot 10^3 \cdot s + 100}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (5);$$

– по каналу «Расход пара – уровень»:

$$W(s)_{\Delta M_D} = \frac{1}{s} \cdot \frac{7.1 \cdot 10^3 \cdot s - 100.3}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (6);$$

– по каналу «Температура питательной воды – уровень»:

$$W(s)_{\Delta M_D} = \frac{1}{s} \cdot \frac{15 \cdot 10^6 \cdot s - 142 \cdot 10^3}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (7);$$

– по каналу «Тепловосприятие экранов – уровень»:

$$W(s)_{\Delta M \Delta T} = \frac{1}{s} \cdot \frac{21.8 \cdot 10^8 \cdot s - 17.5 \cdot 10^5}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} \quad (8).$$

С учетом рассчитанных численных значений параметров передаточных функций элементов АСР построена разработанная инвариантная модель системы в Simulink, представлена на рис. 4.

Для полного расчёта разработки ниже приведём расчёт введённых компенсаторов.

$$W_k = \frac{12.4 \cdot 10^3 \cdot s + 100}{6.7 \cdot 10^{12} \cdot s + 200.7 \cdot 10^9} = \frac{7.1 \cdot 10^3 \cdot s - 100.3}{12.4 \cdot 10^3 \cdot s + 100} \quad (9)$$

Предложено решение о компенсации возмущения по каналу «Расход питательной воды – уровень», проведём сравнительный анализ между кривыми разгона трёхимпульсной АСР и инвариантной АСР.

Разгонные характеристики по каналу «Расход питательной воды – уровень» на рис. 5 имеют вид:

Из анализа графиков кривых разгона видно, что предлагаемая инвариантная АСР имеет преимущества над классической трёхимпульсной АСР, а именно в компенсировании возмущения.

Ниже представим графики переходных процессов, предлагаемой инвариантной АСР и классической трёхимпульсной АСР при основных воздействиях, приведенные на рис. 6 и рис. 7. Результатом регулирования трёхимпульсной АСР получили отклонения в -0.14% при возмущениях 1% от номинальных значений.

В результате введения компенсаторов для возмущений в разработанную инвариантную систему автоматического регулирования и при задании в

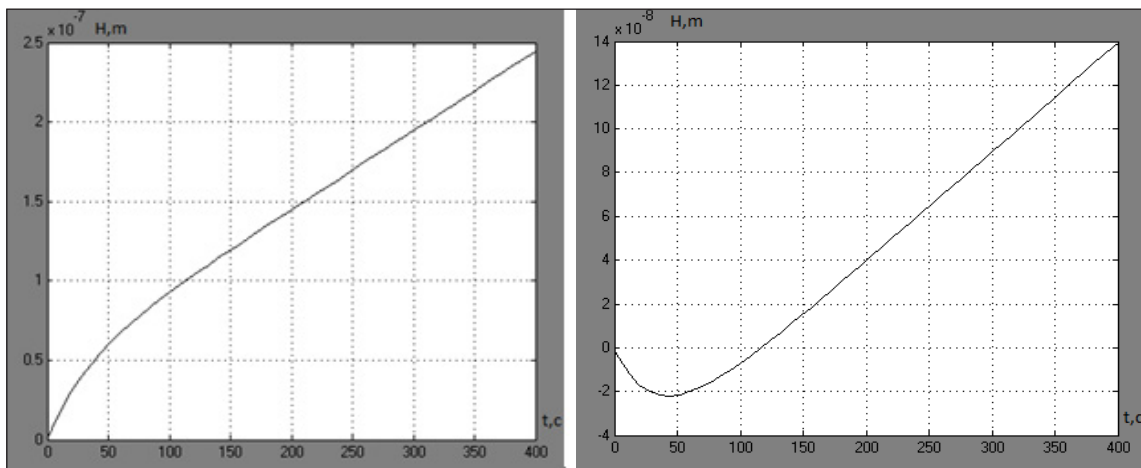


Рис. 5. Кривая разгона по каналу «Расход питательной воды – уровень» инвариантной АСР (а), трёхимпульсной АСР (б)

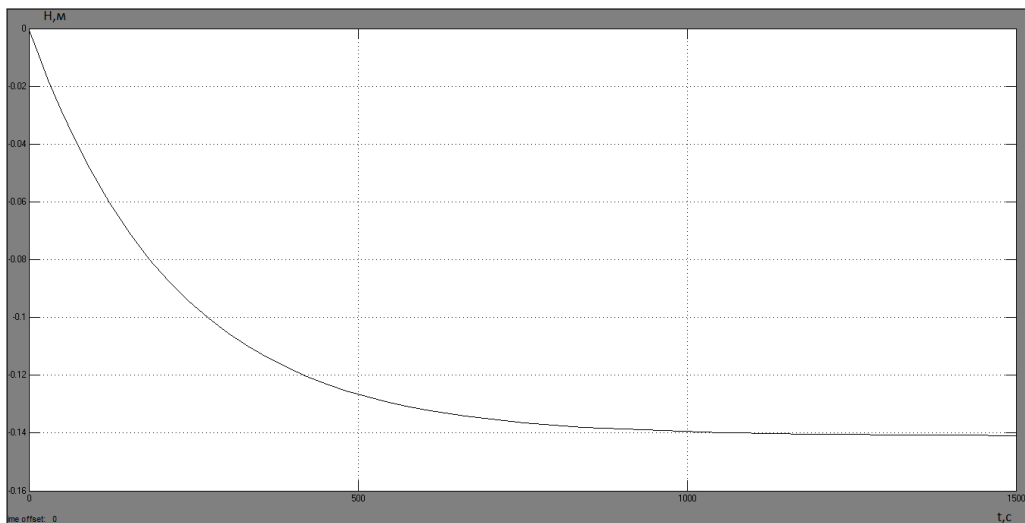


Рис. 6. Переходный процесс отклонения уровня возмущений и задании в 1% от номинальных значений

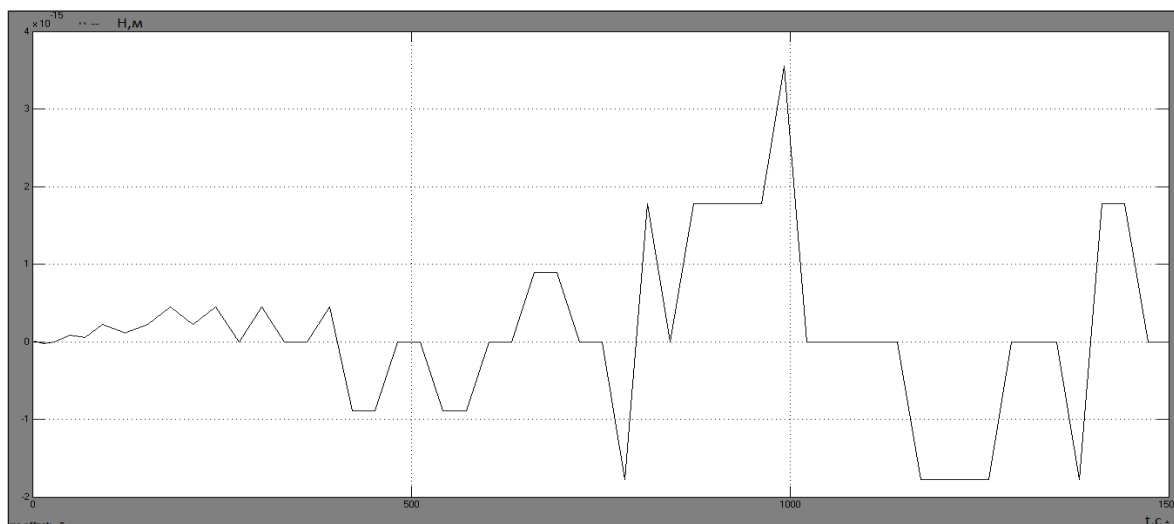


Рис. 7. Переходний процес відхилення рівня возмущений і задання в 10% від номінальних значень

10% від номінальних значень отримуємо відхилення в $3,5 \cdot 10^{-15}$.

Як видно з перехідних процесів, інваріантна система автоматичного регулювання виконує свої поставлені задачі якісно, чим тріхімпульсна АСР. Додавання компенсаторів по кожному каналу возмущень дозволило прискорити отримання потрібного регулювання.

Висновки. Для визначення динамічних характеристик установки генерування пари отримала подальше розвиток математична модель, заснована на розв'язанні рівнянь збереження маси, енергії та об'єму. Була вироблена

лінеаризація системи нелінійних рівнянь. Така модель дозволяє визначити кількісний склад умовної формули динаміки установи генерування пари. В результаті проведеного аналізу впливу зовнішніх возмущень визначені розгонні криві по возмущаючим каналам. Для забезпечення якісної підтримки рівня та його регулювання в установці генерування пари запропоновано метод, заснований на зміні номінальних значень температури живильної води та тиску пари.

Розроблене математичне описання може бути використано для подальшого синтезу системи автоматичного регулювання.

Список літератури:

1. Демченко В.А. Автоматизація та моделювання технологічних процесів АЕС та ТЭС. Одеса «Астропринт», 2001. 50 с.
2. Демченко В.А. Розробка математичної моделі динаміки парогенератора ПГВ-1000 АЕС. Черкаси, 1997. Т. 1. С. 20–69.
3. Тошинський В.І., Бабіченко А.К., Молчанов В.І. та ін. Технічні засоби автоматизації. Ч. 2. Мікропроцесорні регулювальні та виконавчі пристрої: навч. посіб. / за ред. А.К. Бабіченка. Київ, 1977. С. 200.
4. Штапова А.Г., Мефедова Ю.А. Моделювання системи автоматичного регулювання рівня води в парогенераторі атомної електростанції. Молодий учений. 2015. № 22.5. С. 53–56.
5. Кулаков Г.Т., Кухоренко А.Н., Голинко І.М. Інваріантна система автоматичного регулювання. Енергетика. Известия вищих навчальних закладів та енергетических об'єдинень СНГ. 2015. С. 70–71.

ІНВАРІАНТНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ В УСТАНОВЦІ ГЕНЕРУВАННЯ ПАРИ ДЛЯ ЕНЕРГОБЛОКУ 1000 МВТ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Виробництво пари на атомних електростанціях із ВВЕР-1000 здійснюється в спеціальних теплообмінних установках – парогенераторах. Показана актуальність застосування інваріантної системи автоматичного регулювання рівня в парогенераторах. Як альтернатива класичній тріхімпульсній, що експлуатується на енергоблоках ВВЕР-1000, для регулювання рівня запропонована інваріантна сис-

тема автоматичного регулювання, яка істотно підвищує якість регулювання рівня, а також надійність процесу регулювання.

Ключові слова: інваріантна система регулювання, трьохімпульсна система регулювання, автоматизація, математична модель, парогенератор.

**INVARIANT SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL OF LEVEL
IN THE STEAM GENERATION AT POWER UNIT 1000 MW OF NUCLEAR POWER PLANT**

The production of steam at nuclear power plants with VVER-1000 is carried out in special heat units – steam generators. The urgency of an invariant system of automatic control in steam generators is shown. As an alternative to the classical three-pulse, available for operation at VVER-1000 power units, an invariant system of automatic control is proposed for level regulation. Which significantly improves the quality of level control, as well as the safety of the control process.

Key words: invariant control system, three-pulse control system, automation, mathematical model, steam generator.

УДК 621.311.25:621.039:661.654

Киселёва Н.И.

Одесский национальный политехнический университет

Погребной Я.С.

Одесский национальный политехнический университет

Беглов К.В.

Одесский национальный политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА МОЩНОСТИ С ЖИДКИМ ПОГЛОТИТЕЛЕМ ДЛЯ ЭНЕРГОБЛОКА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ВВЭР-1000

В энергосистеме Украины существует несоответствие между выработкой и потреблением электрической энергии в течение суточного цикла, а суммарная доля установок, предназначенных для регулирования нагрузки энергосистемы, очень мала, поэтому актуальным является адаптация действующих энергоблоков атомных электростанций к новым специфическим условиям путем создания автоматизированной системы управления мощностью энергоблока в маневренных режимах. Все украинские атомные электростанции с ВВЭР-1000 эксплуатируются в режиме стабилизации мощности энергоблока на заданном уровне, хотя оборудование первого контура допускает эксплуатацию в режимах маневрирования мощностью. Ранее были предложены новые алгоритмы управления мощностью энергоблока по компромиссно-комбинированной программе регулирования. Одним из элементов указанной системы регулирования является регулятор мощности, который воздействует на реактор изменением концентрации жидкого поглотителя. Таким образом, в статье рассматриваются свойства указанного регулятора.

Ключевые слова: регулятор, мощность, энергоблок, устойчивость.

Постановка проблемы. В многочисленных работах, посвященных проблеме покрытия переменной части графиков нагрузок [1, с. 16–19; 2, с. 128–139], указывается, что повышение доли атомных электростанций (далее – АЭС) в общей установленной мощности требует повышенной маневренности энергооборудования АЭС, то есть работы энергоблоков АЭС в переменном режиме. В [3, с. 56–59] был предложен новый алгоритм поддержания технологических параметров энергоблока. Для реализации предложенного алгоритма в АСУ ТП энергоблока была разработана математическая модель [4, с. 108–122], с помощью которой исследовались свойства энергоблока при различных программах регулирования. Для реализации указанного алгоритма был применен новый регулятор мощности энергоблока. Таким образом, статья посвящена исследованию свойств регулятора мощности.

Анализ последних исследований и публикаций. Влияние концентрации борной кислоты,

а точнее атомов бора ^{10}B , на энерговыделение в активной зоне реактора ВВЭР-1000 исследовалось в ряде работ.

Так, в работе [5, с. 2956] показано, что использование борной кислоты для управления мощностью реакторной установки позволяет значительно увеличить время эксплуатации тепловыделяющих элементов, повышая экономичность эксплуатации АЭС без снижения показателей безопасности.

Работа [6, с. 22] посвящена исследованию свойств первого контура АЭС как объекта управления концентрацией жидкого поглотителя, а именно борной кислоты. Показано, что, с точки зрения управления, реактор по каналу «расход борной кислоты – концентрация борной кислоты» является нелинейным объектом. Нелинейность состоит в том, что статические и динамические свойства существенно отличаются друг от друга при изменении направления воздействия, т. е. при вводе борной кислоты и при её выводе.

В работе [7, с. 18] приведены результаты исследования системы автоматического регулирования концентрации борной кислоты в теплоносителе первого контура АЭС. Показана принципиальная возможность применения стандартного ПИ-закона регулирования для управления нелинейным объектом.

Постановка задания. Таким образом, целью работы является дальнейшее развитие системы регулирования мощностью и исследование регулятора мощности энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 при применении жидкого поглотителя.

Изложение основного материала исследования. В энергоблоке, работающем на электрическую сеть, происходит преобразование тепловой энергии, вырабатываемой в ядерном реакторе, в механическую энергию вала турбины и затем в электрическую энергию в генераторе, как показано на рис. 1.

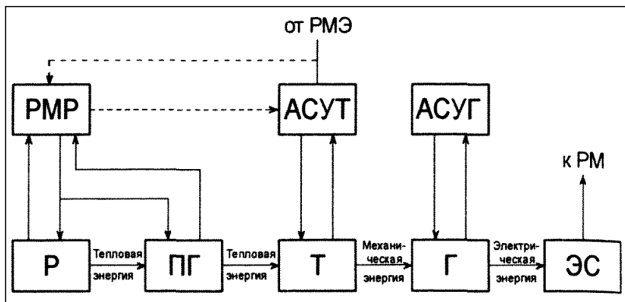


Рис. 1. Схема преобразования энергии и регулирования энергоблока

Основная задача регулирования паросиловой установки – поддержание равенства между количеством производимой и потребляемой энергии. Несоответствие между вырабатываемой энергией в реакторе и потребляемой в турбине проявляется в изменении давления и температуры теплоносителя в 1 контуре и давления (температуры) насыщенного пара во 2 контуре. Указанное несоответствие должно устраняться регулятором мощности реактора (далее – РМР), который оказывает управляющее воздействие либо на реактор, либо на турбину, в зависимости от режима работы энергоблока.

Мощность энергоблока является заданной величиной, при этом она может быть постоянной при работе энергоблока в базовом режиме или переменной при работе в регулирующем режиме.

Энергоблоки работают на энергосистему с большим количеством потребителей электроэнергии. Основная задача регулирования энергосистемы состоит в том, чтобы производить выработку электроэнергии в точном соответствии с непрерывно меняющимся потреблением. Единственным источником информации о величине несоответствия выработки электроэнергии её потреблению является отклонение частоты в энергосистеме от её номинального значения. Задачу регулирования частоты и мощности в энергосистеме решают регуляторы частоты и мощности турбины и регулятор мощности энергосистемы. При неизменной частоте сети мощность турбины вполне определенная, и для её изменения необходимо изменять задание регулятору частоты вращения.

С этой целью турбины оснащены механизмом управления турбиной.

Таким образом, система автоматизированного управления мощностью энергоблока (далее – САУМ) включает в себя регуляторы давления пара, частоты и мощности реактора и турбины. Конкретный вид САУМ определяется типом реактора, турбогенератора, тепловой схемы энергоблока и режимом работы в энергосистеме.

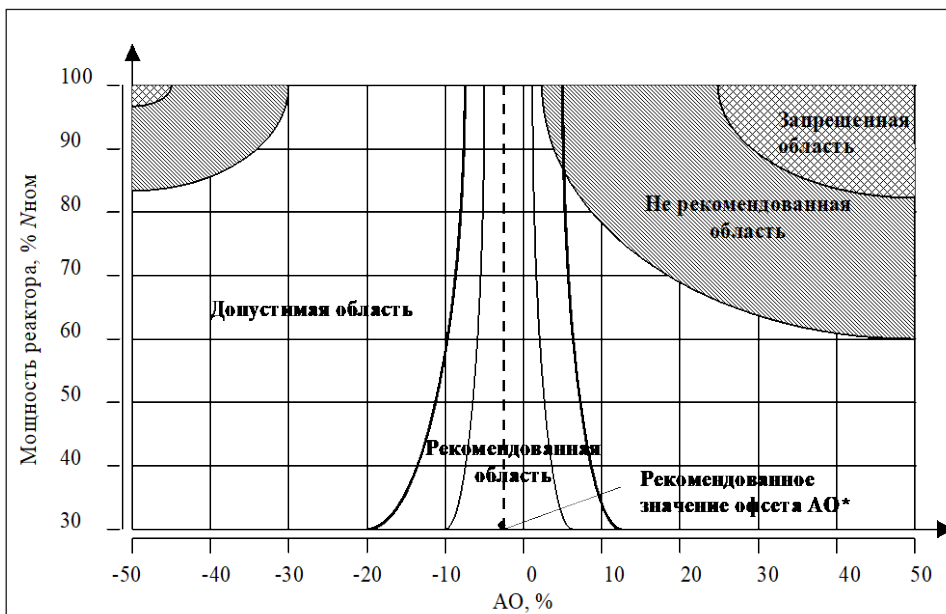


Рис. 2. Зависимость аксиального оффсета от текущего уровня мощности реактора

Для двухконтурных АЭС важным является характер изменения параметров рабочих сред по контурам (давление, температура, расход) при изменении мощности в статических режимах работы (так называемая программа регулирования). Выбор статической программы регулирования зависит от многих физических, конструктивных, технико-экономических особенностей энергоблока и режима использования его в энергосистеме. Выбранная программа регулирова-

ния реализуется с помощью системы управления энергоблоком.

При выборе статических программ регулирования учитывают технико-экономические показатели, а также длительность работы энергоблока на сниженных уровнях мощности. Наибольшее распространение получили программы с постоянным давлением пара во 2 контуре ($P_s = \text{const}$), с постоянной средней температурой теплоносителя в 1 контуре ($t_{cp} = \text{const}$) и компромиссные программы.

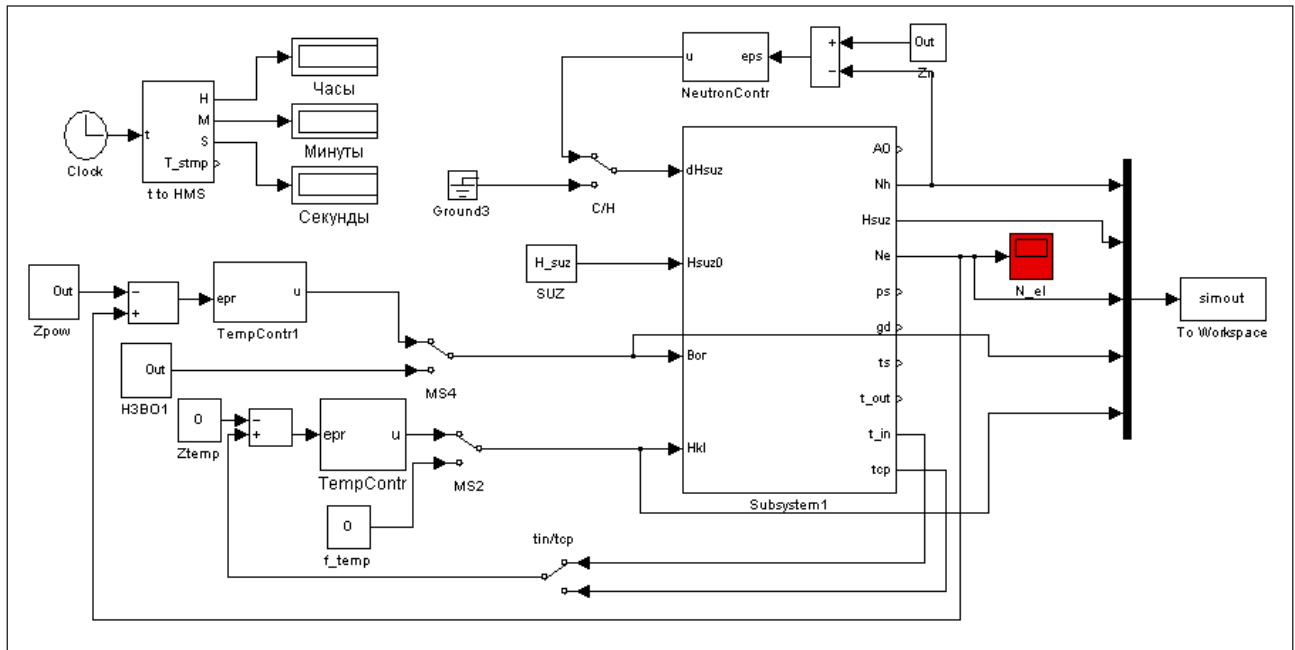


Рис. 3. Схема АСР мощности энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 по компромиссно-комбинированной программе ргулирования

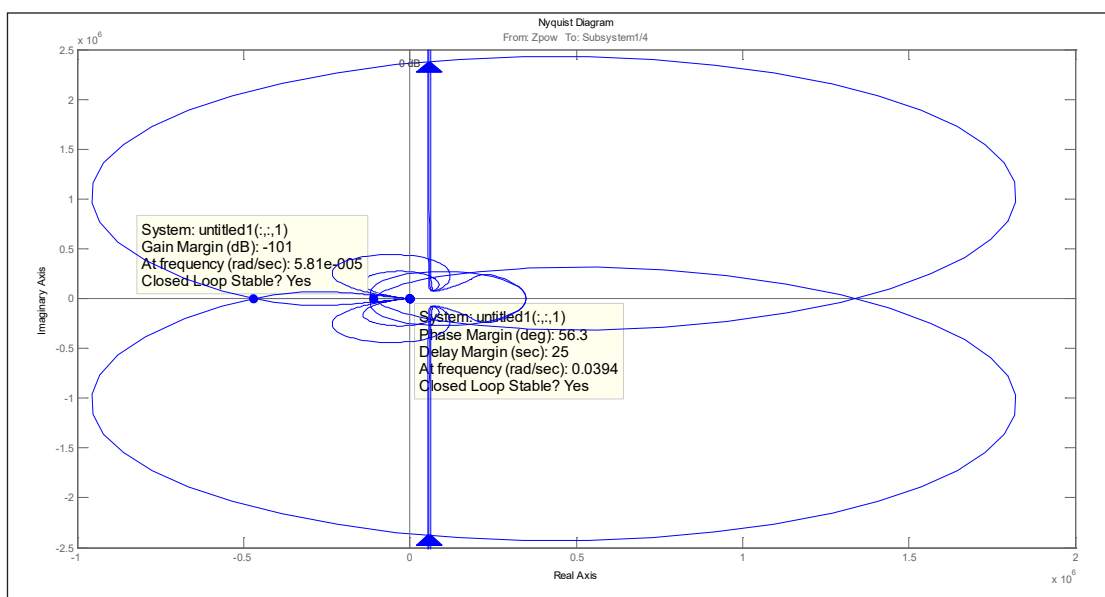


Рис. 4. Годограф Найквиста для энергоблока по каналу концентрация $H_2O_3 \rightarrow N_{эл}$ система разомкнута

Однако всем вышеперечисленным программам регулирования присущ общий недостаток: в них не контролируется такой важный для надежной эксплуатации ТВЭЛ параметр, как аксиальный офсет [8, с. 19–27].

Значения АО должны поддерживаться в определенных пределах в зависимости от текущего уровня мощности, как это показано на рис. 2.

Превышение предельно допустимых значений коэффициентов неравномерности и АО может привести к неустойчивости нейтронного поля ядерного реактора и возникновению ксеноновых колебаний высотного распределения энерговыделения, увеличению времени стабилизации состояния реактора в переходных режимах [9, с. 3–8].

Неравномерность нейтронного поля реактора снижает экономические показатели работы РУ и в некоторых случаях может привести к возникновению предаварийных и аварийных ситуаций [10, с. 252–257; 11, с. 231–233].

Так как при эксплуатации реактора регулирующие стержни ОР СУЗ находятся только в верхней части активной зоны, то поддерживать АО возможно только перемещая ОР СУЗ. С другой стороны, в типовых программах регулирования регулирующие стержни используются для поддержания мощности реактора в целом.

Результаты работы. Для решения указанного противоречия предлагается мощность реактора изменять путем изменения концентрации поглотителя (раствора борной кислоты) в воде первого контура. Возникающие от мощностного эффекта реактивности колебания аксиального офсета компенсировать перемещением регулирующих стержней ОР СУЗ.

Таким образом, появляются два новых контура регулирования. Соответственно, возникает задача анализа свойств объекта регулирования по новым каналам: концентрация борной кислоты – нейтронный поток и положение ОР СУЗ – аксиальный офсет.

В работе [8] приведена математическая модель энергоблока, с помощью которой была проанализирована устойчивость объекта управления по отдельным каналам, а также устойчивость систем регулирования, поддерживающих указанные технологические переменные.

Для реализации поставленной задачи была использована схема регулирования мощностью энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, созданная в среде имитационного моделирования Simulink пакета MATLAB (1–4 АЕ К761327 ВД, № 308918). Схема регулирования мощностью энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 приведена на рис. 3.

С помощью приведенной схемы проводилось исследование АСР мощности по каналу «Концентрация H_2BO_3 (Вор) – Электрическая мощность (Ne)». Проверяться

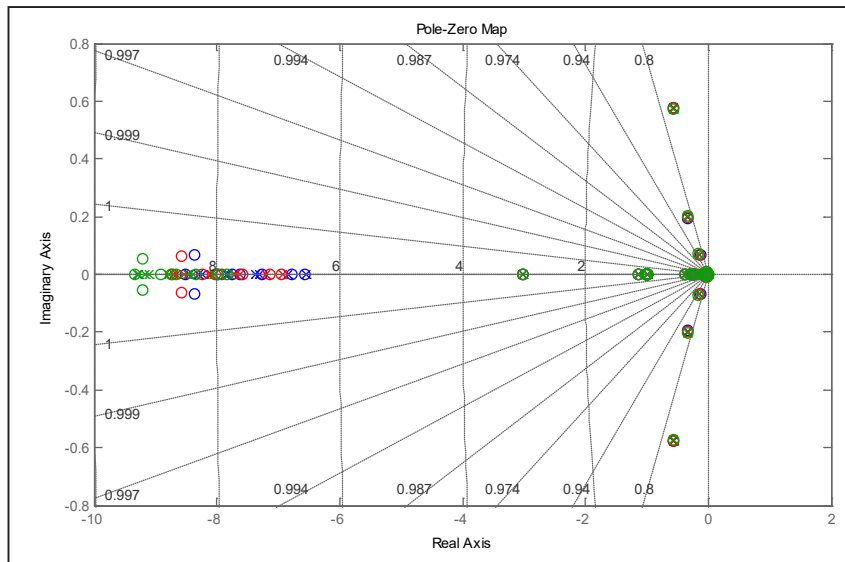


Рис. 5. Запас устойчивости по критерию Найквиста – Михайлова для энергоблока по каналу концентрация H_2BO_3 -> Нэл система разомкнута

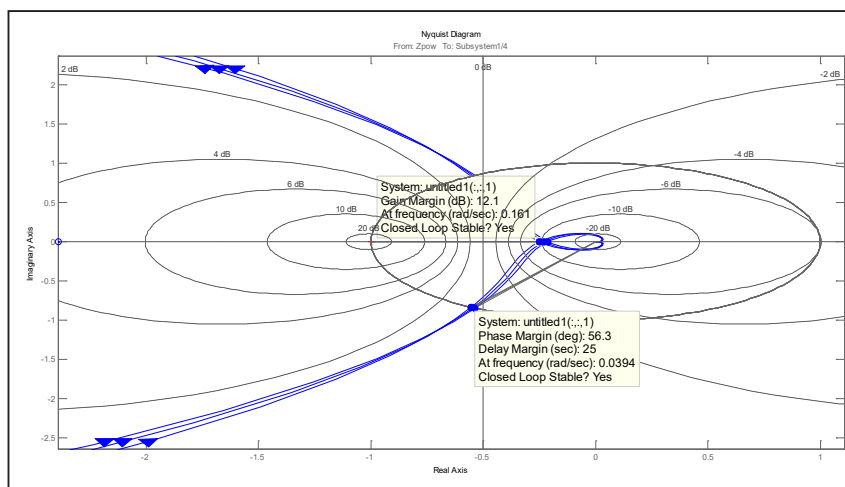


Рис. 6. Расположение нулей и полюсов системы регулирования с разомкнутой обратной связью

устойчивость системы регулирования по критерию Найквиста – Михайлова. На рис. 4 и 5 представлены годографы разомкнутой АСР мощности. Из анализа графиков можно сделать следующие выводы.

Во-первых, на разных уровнях мощности энергоблока статические и динамические характеристики реакторной установки имеют большие различия. Причем с уменьшением мощности эти различия нивелируются.

Во-вторых, система устойчива при всех уровнях мощности энергоблока. Устойчивость наблюдается даже при отключенном регуляторе.

На рис. 6 и 7 показано расположение нулей и полюсов разомкнутой системы на комплексной плоскости. На рисунках приведены семейства нулей и полюсов, соответствующих линеаризованной модели на разных уровнях мощности от 100 до 80%.

Анализ расположения полюсов линеаризованной системы также позволяет сделать вывод об устойчивости системы. Несмотря на наличие комплексного корня с положительной вещественной частью, систему можно считать устойчивой, т. к. он имеет значение $4 \cdot 10^{-6}$. И, по сравнению с другими корнями, не оказывает значительного влияния на длительность переходных процессов в системе.

Далее было проведено исследование системы после замыкания обратной связи. На рис. 8 приведен годограф, а на рис. 9 и 10 – расположение нулей и полюсов для замкнутой системы.

Анализируя расположение полюсов на приведенных рисунках, можно сделать вывод, что применение регулятора значительно улучшает динамические характеристики системы. Все полюса сдвигаются влево по действительной оси. Кроме того, регулятор компенсирует нелинейные свойства реакторной установки, приближая замкнутую АСР по своим характеристикам к инерционному звену второго – третьего порядка.

Выводы. Проведенный анализ показывает, что при регулировании мощности реактора изменением концентрации борной кислоты реактор без регулятора является устойчивым на всех уровнях мощности. Устойчивость обеспечивается регулятором аксиального офсета. После замыкания обратной связи система регулирования с ПИ-регулятором устойчива с запасом по амплитуде 12,1 dB и по фазе $56,3^\circ$. Причем с уменьшением мощности запас устойчивости увеличивается. Это видно из рис. 9 и 10 по смещению корней характеристического уравнения влево по действительной оси. Физически это объясняется уменьшением потока нейтронов в активной зоне, вследствие их поглощения атомами ^{10}B .

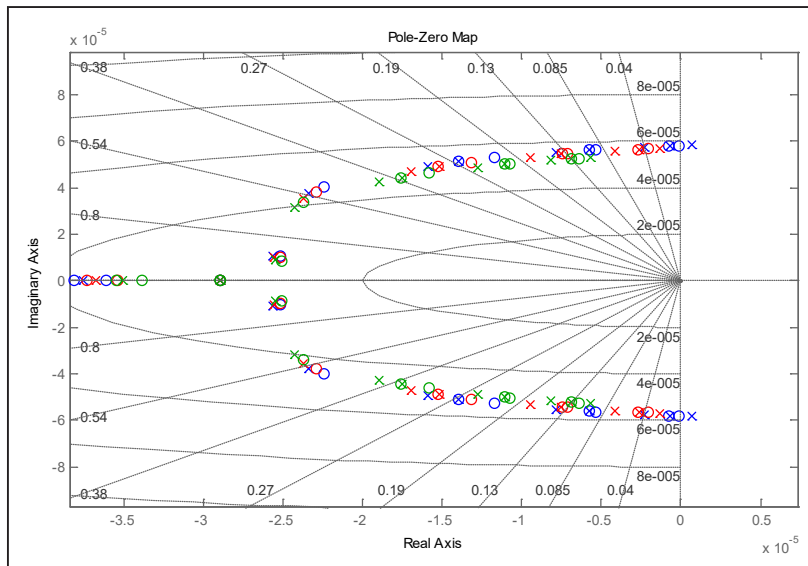


Рис. 7. Расположение нулей и полюсов системы регулирования с разомкнутой обратной связью в окрестностях мнимой оси

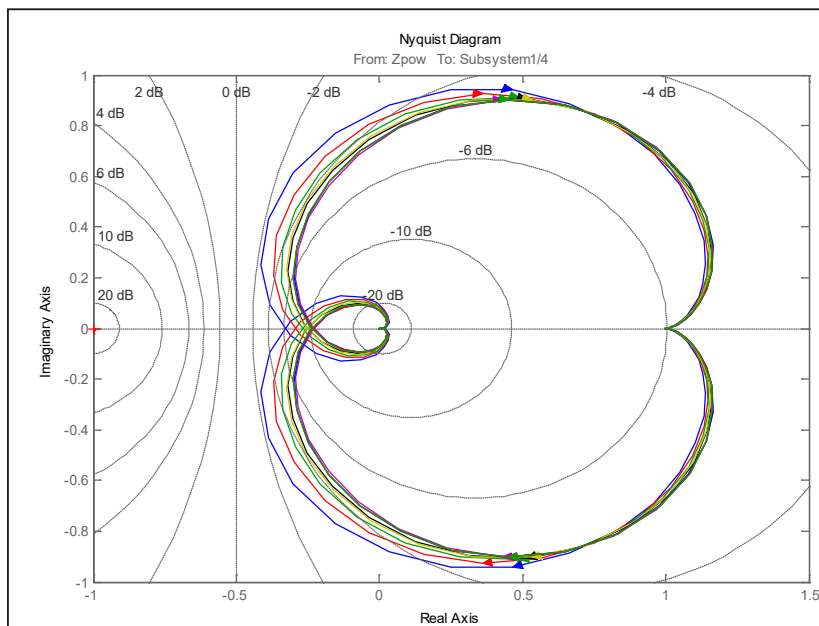


Рис. 8. Годограф Найквиста для энергоблока по каналу концентрация $\text{H}_2\text{BO}_3 \rightarrow \text{Nэл}$ для замкнутой систем

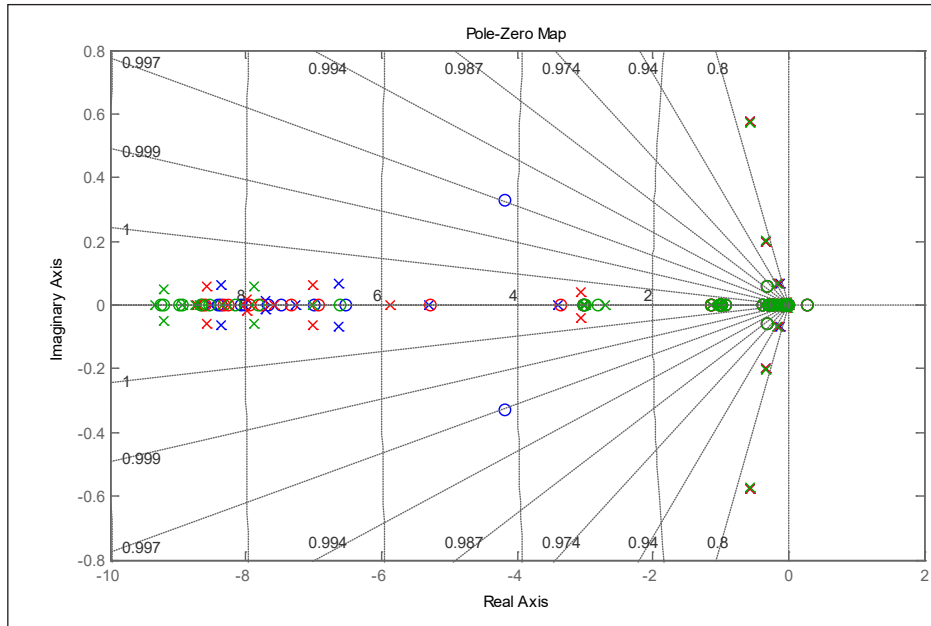


Рис. 9. Расположение нулей и полюсов системы регулирования с замкнутой обратной связью

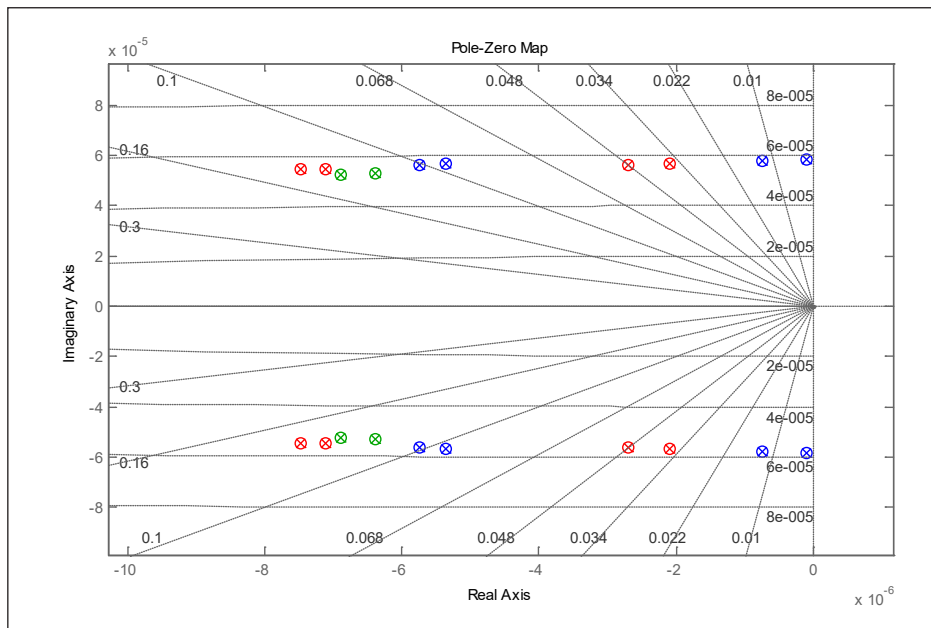


Рис. 10. Расположение нулей и полюсов системы регулирования с замкнутой обратной связью в окрестностях мнимой оси

Список литературы:

1. Беркович В.М., Горохов В.Ф., Татарников В.П. О возможности регулирования мощности энергосистемы с помощью атомных электростанций. Теплоэнергетика. 1974. № 6. С. 16–19.
2. Максимов М.В. Метод оценки эффективности алгоритма маневра мощностью энергоблока с реакторами ВВЭР-1000. Известия вузов. Ядерная энергетика. 2008. № 4. С. 128–139.
3. Баскаков В.Е. Алгоритм эксплуатации энергоблока с ВВЭР в поддержании суточного баланса мощности энергосистемы. Труды Одесского политехнического университета. 2007. Вып. 2 (28). С. 56–59.
4. Современные технологии управления: в 2 т. монография / под общ. ред. С.В. Куприенко; Sworld. Одесса: Куприенко С.В., 2012. 179 с.

5. Pelykh S.N., Maksimov M.V. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit. Nuclear Engineering and Design. 2011. Vol. 241. № 8. P. 2956–2963.
6. Медведєв Р.Б., Сангінова О.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. Наукові вісті Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». 2002. № 2 (22). С. 22.
7. Волошкіна О.О., Беглов К.В., Плахотнюк О.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. 2015. Т. 7. № 4. С. 18–24.
8. Фощ Т.В., Максимов М.В., Никольський М.В. Анализ влияния методов управления мощностью энергоблока с водо-водяным реактором на аксиальный офсет. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 2 (8). С. 19–27.
9. Аниканов С.С., Дунаев В.Г., Митин В.И. Управление энергораспределением ВВЭР-1000 в маневренном режиме. Атомная энергия. 1993. Т. 75, № 1. С. 3–8.
10. Коренной А.А., Титов С.Н., Литус В.А., Неделин О.В. Управление аксиальным распределением поля энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 при переходных процессах. Атомная энергия. 1998. Т. 88. № 4. С. 252–257.
11. Филимонов П.Е., Аверьянова С.П. Поддержание равновесного офсета – эффективный способ подавления ксеноновых колебаний в ВВЭР-1000. Атомная энергия. 2001. Т. 90. № 3. С. 231–233.

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЯТОРА ПОТУЖНОСТІ З РІДКИМИ ПОГЛИНАЧАМИ ДЛЯ ЕНЕРГОБЛОКА АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ВВЕР-1000

В енергосистемі України існує невідповідність між виробленням і споживанням електричної енергії протягом добового циклу, а сумарна частка установок, призначених для регулювання навантаження енергосистеми, дуже мала, тому актуальним є адаптація діючих енергоблоків атомних електростанцій до нових специфічних умов шляхом створення автоматизованої системи управління потужністю енергоблоку в маневрених режимах. Всі українські атомні електростанції з ВВЕР-1000 експлуатуються в режимі стабілізації потужності енергоблоку на заданому рівні, хоча обладнання першого контуру допускає експлуатацію в режимах маневрування потужністю. Раніше були запропоновані нові алгоритми управління потужністю енергоблоку за компромісно-комбінованою програмою регулювання. Одним з елементів зазначеної системи регулювання є регулятор потужності, який впливає на реактор зміною концентрації рідкого поглинача. Таким чином, у статті розглядаються властивості зазначеного регулятора

Ключові слова: регулятор, потужність, енергоблок, стійкість.

RESEARCH OF POWER CONTROL SYSTEM WITH LIQUID ABSORBERS FOR NUCLEAR POWER PLANT WITH WWER-1000

In the grid of Ukraine there is disparity between making and consumption of electric energy during day's cycle, and total stake of settings, intended for adjusting of loading of grid very small, therefore actual is adaptation of operating power units nuclear power plant to the new specific terms by creation of automated control systems power of power unit in the maneuver modes. All Ukrainian nuclear power plants with WWER-1000 is exploited in the mode of stabilizing of power of power unit at set level, although the equipment of the first contour assumes exploitation in the modes of maneuvering power. The new algorithms of management power of power unit were before offered on the compromise-combined program of adjusting. One of elements of the indicated system of adjusting is a regulator of power, which affects reactor a change the concentration of liquid absorber. Thus, the article examines the properties of the controller.

Key words: controller, power, power unit, steadiness.

УДК 004.9.056.5

Коваленко Д.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Олещенко Л.М.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Юрчишин В.Я.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДЕЯКІ ПИТАННЯ БЕЗПЕКИ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Проаналізовано еволюцію та природу комп'ютерних вірусів. Розглянуто аналогію між комп'ютерними та біологічними екосистемами. Виділено основні відмінності між біологічними та комп'ютерними вірусами. Розглянуто можливі напрямки використання знань про імунну систему людини та механізми боротьби з хворобами для зміцнення стійкості комп'ютерних систем до дії різного типу комп'ютерних вірусів. На основі аналогії комп'ютерних вірусів із живими екосистемами виділено перспективи розвитку нових технологій для підтримання оптимального функціонування комп'ютерних систем і мереж.

Ключові слова: інформаційна безпека, комп'ютерний вірус, шкідливе програмне забезпечення, антивірусна програма, вразливості, аналогія, операційна система, BLAST, *Welchia*, ДНК, РНК, біологічна екосистема, реплікація, інфікування, імунітет.

Постановка проблеми. Тема інформаційної безпеки стала сьогодні однією з найголовніших, оскільки будь-які порушення в роботі обчислювальних систем із кожним роком стають для людства все більш небезпечними. Однією з актуальних проблем, пов'язаних зі «здоров'ям» комп'ютерів, є проблеми їх захисту від комп'ютерних вірусів і хакерських нападів.

У кібербезпеці можна виділити два основні типи загроз. Першим типом є викрадення інформації з метою скористатися результатами чужої праці. Метою другого типу є бажання проникнути у ваше оточення і якомога більше його зруйнувати. Людство має багато інструментів для боротьби з цими загрозами. Стосовно інформаційної безпеки, перша складова частина пов'язана з шифруванням і засекреченням інформації, вона має найбільші напрацювання й у цій статті не розглядатиметься. Друга пов'язана з навмисним пошкодженням інформаційних систем комп'ютерними вірусами й однією з найактуальніших проблем, пов'язаних із захистом від шкідливих програм [2–5]. На наш погляд, вивчення природи комп'ютерних вірусів і їх аналогії з живими екосистемами може дати

людству відповіді на численні питання та сприяти розвитку нових технологій для підтримання оптимального функціонування комп'ютерних систем і мереж. Тому розглянемо більш детально ці питання.

Викладення основного матеріалу дослідження. *Еволюція та природа комп'ютерних вірусів.* Комп'ютерний вірус – це шкідлива програма, здатна до створення своїх функціонально ідентичних копій. Віруси вміють розмножуватися, мутувати і заражати інші комп'ютерні програми.

Вперше слово «комп'ютерний вірус» використав Фред Коен (Fred Cohen). У ті роки можливість існування вірусів розглядалася тільки теоретично, й алгоритми їх функціонування описувалися не мовами програмування, а термінами системи команд математичних формалізмів типу «машини Тюрінга» або нормальних алгоритмів Маркова. Коен розглянув тільки ті можливості «машини Тюрінга», дані яких (на магнітній стрічці) призначені для подальшої інтерпретації і самі є програмами [6; 7]. Ф. Коен вивчав саморозмножуючі комп'ютерні «механізми» з теоретичних позицій, довів можливість існування саморозмножую-

чих програм у захищених операційних системах (далі – ОС) і продемонстрував декілька практичних реалізацій для комп'ютерів VAX під управлінням ОС UNIX, розглядаючи цю проблему в ідеалізованій ОС без будь-яких дефектів. Наявність «дірок» в ОС збільшувала масштаби епідемії. Автори перших вірусів самостійно відкривали невідомі особливості ОС і вчилися користуватися ними. Але пізніше (1988 р.) почала складатися ситуація, коли виявлялися не тільки самі віруси, але і їх ретельно прокоментовані вихідні тексти.

Ідея створення реплікуючих сутностей зародилася ще в 50-х рр. минулого століття. Американці проводили дослідження зі створення і розповсюдження в ЕОМ таких програмних продуктів. Одна з таких робіт проводилася на IBM 650. Сутності могли розмножуватися, мутувати, знищувати (поїдати) одне одного. «Їжею» для таких сутностей були ненульові елементи. Цим самим людина безпосередньо долучилася до моделювання живої матерії і до небезпечної гонитви за лідерством у цьому напрямку. Саме тому у світі зараз проводиться такий великий масштаб антивірусних робіт із залученням найдосвідченіших фахівців і величезних ресурсів. Для фоннейманівської архітектури обчислювальних систем програмний код і дані не розрізнені, й очікувати тут на суттєві здобутки марно. У сучасних процесорах та ОС робляться спроби розділити код і дані введенням ознак виконуваного коду і захисту від запису для різних ділянок пам'яті. Але поки ці ознаки можна довільно «вмикати» і «вимикати», принципових заборон існуванню вірусів нема. Вони з'являться, якщо обчислювальна система реалізована за правилами альтернативної архітектури, наприклад, «гарвардської». Згідно з цією архітектурою, код і дані мають бути розділені фізично й існувати в різних масивах пам'яті. Відповідно, процесор повинен працювати з двома комплектами системних магістралей – шин адреси, даних і вводу – виводу. Це накладно, але такий принцип вже використовується в мікроконтролерних системах. Повсюдне введення «гарвардської» архітектури означає корінний перегляд практики програмування і взагалі використання комп'ютерної техніки.

Метою статті є пошук можливих напрямків використання знань про імунну систему людини та механізми боротьби з хворобами для підвищення стійкості комп'ютерних систем до дії різного типу комп'ютерних вірусів.

Використання аналогії між комп'ютерними та біологічними екосистемами. Комп'ютери можна порівняти з живими екосистемами. Кри-

хитні Unix-програми підтримують роботу масивних додатків на основі графічного інтерфейсу, приховані процеси обертаються в тандемі, щоб створити інформацію. Оскільки людство створило штучні джунглі з транзисторів і обчислень, у ньому також було створено віруси.

Комп'ютерний вірус, незважаючи на те, що він є продуктом людської творчості, є природною і, можливо, необхідною частиною мережевої обчислювальної екосистеми. Віруси уповільнюють процеси, пошкоджують дані, можуть завдати фізичної шкоди (як у випадку з w32.Stuxnet), а також зберігатися в чіпах PRAM і BIOS. Вони можуть перетинати екологічні кордони, як, наприклад, у випадку USB-переходу stuxnet або AppleiPod, випадково завантаженого за допомогою вірусів Windows, вони стають більш стійкими. Віруси, включені за допомогою поліморфних або метаморфічних движків, створені для обфускації антивірусного програмного забезпечення (далі – ПЗ), що дозволяє більш широко розповсюджувати і сповільнювати конструктивний відгук із боку тих, хто займається цим захистом. Віруси діють шляхом зараження хоста і використання його механізмів для відтворення та інших цілей.

У живому світі бактерії становлять собою одноклітинні організми, які процвітають у різних органічних середовищах, викликаючи ряд ефектів в одному і тому ж вигляді. Наприклад, бактерії служать основним механізмом, що сприяє розпаду в біологічних системах (наприклад, бактерії, які допомагають перетравлювати їжу). Відомі випадки спроб створити «корисні» віруси. У середині 90-х рр. існувала прихована битва (різного роду), поширена у мільйонах системах по всьому світу. Вірус BLAST і хробак Welchia були двома вірусами з різними намірами. Blast (w32/Lovesan.worm) був шкідливим вірусом, який заразив системи Windows через незахищений механізм віддаленої системи вікна, хробак Welchia заражав системи за тим же механізмом, але його корисне навантаження, яке повинне бути запущене за успішної інфекції, було серією корисних патчів для ПЗ Windows. Він також фіксував механізм входу і через деякий час знищувався. Незважаючи на цей добрий намір, Welchia створив проблеми для багатьох користувачів: зіпсував системні конфігурації, прив'язав мережевий трафік і перезапустив системи, коли була встановлена його корисне навантаження [8; 9].

У живих системах бактерії виконують роль здорового розпаду та стійкості до опору господаря проти довкілля. Існує припущення щодо

можливості створення ПЗ та ОС, які були б сприйнятливі до вірусів, хоча б для боротьби з надлишком застарілих систем, що виникають за більш дешевих обчислень і більшого доступу. Можливо, мережа комп'ютерів також може мати хороші відносини в галузі охорони здоров'я й обслуговування один з одним, внаслідок чого всі стають сильнішими.

Знання про біологічні віруси можуть допомогти визначити маршрути, які були зроблені розробниками вірусів. За аналогією до біологічних вірусів як живих організмів, що складаються з ДНК або РНК всередині білкового покриття, їх кіберпросторові аналоги (комп'ютерні програми) паразитують на своєму хості і можуть відтворюватися лише всередині цього хоста.

Подібно до біологічного вірусу, який повинен мати правильну специфіку господаря і тканини, щоб закріпитися, комп'ютерний вірус повинен бути сумісний із системою, щоб закріпитися у ній. Вірус, черв'як або троянський кінь можуть, як і ВІЛ (вірус імунодефіциту людини), бути прихованими і стати активними через деякий проміжок часу. Ці три класи комп'ютерних шкідливих програм також можуть мати сотні варіантів і модифікованих версій, які аналогічні мікробній різноманітності. Подібно до того, як імунна система людського тіла виходить з-під контролю і починає руйнувати себе (автоімунна хвороба), комп'ютери також можуть стати жертвою таких захворювань.

Біологічні віруси «крадуть» вірулентні гени інших вірусів і стають більш злякисними. Це також відбувається й у разі шкідливого ПЗ комп'ютера. Всього за тиждень після вересневого нападу на Сполучені Штати був випущений небезпечний черв'як Nimda, який об'єднав найпотужніші стратегії двох інших програм хробака і поширився швидше, ніж будь-який інший попередній черв'як. Природа розвинула імунітет, який захищає рослини і тварин від широкого спектру патогенів. У кишечнику кожної людини є природна мікрофлора, яка забезпечує частковий захист від інфекцій. Чи можемо ми розробити «доброякісні» комп'ютерні віруси, які можуть безперешкодно поширюватися через Інтернет, автоматично блокувати записи для злякисних вірусів, оновлювати антивірусні програми або інактивувати наявні віруси? Мікробіологи можуть допомогти програмістам боротися з вірусами – комп'ютерний імунітет може бути дорогим, але в кінцевому підсумку ризику і витрати можуть бути виправдані. Існує припущення, що, навпаки, вивчення комп'ютерних шкідливих програм може допомогти контролювати появу інфек-

ційних захворювань у людей. Інтернет може бути гарною моделлю для вивчення розвитку інфекцій і того, як вони поширюються у нашому світі. Швидкість еволюції віртуальних патогенів дозволяє стежити за процесом мутації і вибору в реальному часі [10].

Порівняння між комп'ютерними і людськими вірусами потрібне для того, щоб дослідники могли краще розуміти, чому імунна система людини набагато краще бореться з вірусами, ніж антивірусні системи.

Атака «Відмова в обслуговуванні» (DoS) схожа на дію ВІЛ, тому що обидва спрямовані на перевантаження системи. ВІЛ атакує імунну систему, роблячи людину більш вразливою до певних захворювань. Комп'ютерні віруси, такі як W32 / Slippy, також використовують цю стратегію, встановлюючи шкідливу програму в якості авторизованого додатку для обходу брандмауера Microsoft. Дослідники також вказали, що і люди, і комп'ютери заражають себе. Комп'ютери можуть заразитися, відвідавши веб-сайт і завантаживши шкідливу програму, вбудовану в сайт, який намагається встановити себе на комп'ютері.

Відомо, що біологічні віруси, такі як вірус грипу, змінюються після реплікації. Коли віруси реплікуються, вони мутують. Таку поведінку можна порівняти з тим, як працюють віруси Conficker і Koobface. Це кошмар для аналітиків безпеки, тому що кожен реплікований зразок значно відрізняється від свого попередника. Однією з важливих відмінностей між цими поліморфними вірусами є те, що комп'ютерні віруси тільки змінюють форму (змінюється тільки пакет, код залишається незмінним). Комп'ютерні віруси, подібні до Conficker, також інкубують, ховаючись у системах, щоб атакувати пізніше, що можна порівняти з грипом.

Розглянемо основні відмінності між біологічними і комп'ютерними вірусами. Якщо хтось напише програмний код вірусу грипу, файл, який містить код цього вірусу, буде не більшим 22 КБ. Комп'ютерні віруси набагато більші. Дослідники відзначають, що біологічні віруси не можуть застосовувати методи, зіставні з методами шифрування й антидетонації. У цьому разі виникають серйозні проблеми з виготовленням ліків, що усувають такі варіації вірусу. Існує гіпотеза, що людські та комп'ютерні віруси можуть сходитися в майбутньому. Більшість людських вірусів ДНК або РНК-коду містять основні генетичні інструкції для усіх відомих живих організмів [9; 10]. За словами дослідників [9; 10], межа між цифровим і

біологічним світом розмивається, цитуючи кібернетичний протез як хороший приклад. Вони відзначають, що у деяких людей є кілька електронних пристроїв у їх тілі, наприклад, кардіостимулятор, стимулятори мозку і кохлеарні імплантати. Як тільки ці пристрої будуть взаємодіяти із зовнішніми машинами, що в більшості випадків необхідно в якийсь момент, теоретично вони можуть стати вразливими для комп'ютерних вірусів.

У 2002 р. вчені змогли синтезувати поліовірус. Відтоді біотехнологія просунулася далі, що дозволило синтезувати бактерії, й організми генетично модифікуються майже щодня. Крім того, весь код синтетичної ДНК зберігається на комп'ютерах. У 2010 р. сумнозвісний вірус Stuxnet зміг проскочити через установку зі збагачення урану, захопити контроль над своїм ПЛК (програмований логічний контролер) і знищити його пристрій.

Дослідники намагаються знайти відповідь на питання, чи можливо розробити вірус зі шкідливими послідовностями ДНК, які могли б, коли вони були записані в біти, використовувати ці уразливості. Використання кодованого вірусу для впливу на біологію людини у військових цілях малоймовірно, оскільки комп'ютерний вірус набагато важче контролювати, ніж, наприклад, бактерії сибірської виразки. Звільнення вірусу може мати неприємні наслідки і заражати власну армію нації.

Віруси мають багато характеристик, і серед них – їх життєвий цикл. У біологічному контексті віруси є об'єктами, що складаються з генома в білковій оболонці (капсиді), оточеної в деяких типах вірусів мембраною. Їм потрібно проникнути у живу клітину (осередок хостингу), щоб вона могла відтворюватися. Комп'ютерні віруси, як і інші типи шкідливих програм, повинні вставляти свій власний код в іншу комп'ютерну програму, щоб реплікувати і виконуватися. Обидва типи вірусів не можуть копіюватися автономно. Тому перша проблема вірусів полягає у тому, щоб досягти свого хостингу або розміститися в ІТ-системі. Успішний механізм зараження є ключем до їх успіху. Порівняння з комп'ютерними вірусами може бути поширене на інші типи шкідливих програм. Фаза введення біологічних вірусів забезпечує їх захист від несприятливих умов (низька або висока температура, надмірна вологість тощо) і дозволяє їм виживати доти, поки вони не зможуть проникнути в господаря. Прикріплення вірусу до клітини-хазяїна є передумовою для його вторгнення. Потім генетичний матеріал вірусу вивільняється всередині клітини-госпо-

даря. Так само комп'ютерні віруси спочатку повинні отримати доступ до апаратних засобів або ПЗ цільового користувача. Первісна системна інфекція зазвичай виконується з використанням соціальної інженерії і вразливостей безпеки, часто за допомогою наявних у продажі наборів експлоїтів, які часто зачіпають давно відомі уразливості.

Як тільки набір експлоїтів або вірус може заразити хост-систему, починається другий етап, і завантажується корисне навантаження (дані, які виконуватимуть шкідливу активність) з веб-сайту або запускає вбудоване корисне навантаження. Потім шкідливе ПЗ намагається зберегти хост-систему і знаходить файли або процеси з хорошими цілями. Всередині клітини-господаря вірус може залишатися бездіяльним (прихованим) або негайно почати реплікацію. Аналогічно комп'ютерні віруси, а також інші типи шкідливих програм можуть залишатися бездіяльними після зараження або почати реплікувати себе і поширюватися, щоб заражати інші хости або мережі.

У біології реплікація дозволяє вірусу виробляти численні копії свого геному й упаковувати ці нові копії в капсиди. У клітині господаря вірус продукує елементи, необхідні для його реплікації, використовуючи механізм клітин-господарів. Таким чином, заражена клітина-господар працює в інтересах вірусу. Після того, як зрілі нові віруси виходять за межі осередку хоста, вони вторгаються в інші осередки для нового циклу реплікації. Комп'ютерні віруси поміщають копію себе в інше ПЗ, зберігають свою актуальність в ОС або в інших ділянках диска або пам'яті. Таким чином, кожен хост має копію шкідливої програми, яка сама реплікуватиметься і поширюватися далі, заражаючи все більше комп'ютерів. Тригер є конкретною подією, яка призводить до виконання шкідливого коду комп'ютера, наявності інших програмних продуктів або файлу або конкретної дії користувача. Після активації за допомогою тригера комп'ютерний вірус виконує функцію, для якої він призначений: виконується етап виконання (виконується корисне навантаження). Це може бути руйнівним, наприклад, у разі видалення або пошкодження файлів на диску, шпигунства на стороні користувача у вигляді клавіатурних шпигунів, захоплення екрану або фільтрації даних.

Висновки. Сьогодні характеризується появою нових типів вірусів, які активно освоюють численні прогалини в програмах інформаційних систем. Кількість виявлених потенційних цілей для зараження вірусами збільшується з кожним роком, проте якість тестування програмного забезпечення

ще не досягло потрібного рівня. Розглянувши аналогії між біологічними та комп'ютерними вірусами, можемо припустити можливу користь і небезпеку нових форм матерії, які створює людство. Вивчення природи комп'ютерних вірусів може слугувати вивченню нових механізмів боротьби з хворобами. Механізми дії імунітету людини також можуть слугувати створенню нових технологій

захисту комп'ютерних систем від дії шкідливого вірусного ПЗ. Сучасні ІТ-технології досягли такого рівня і таких масштабів, що їм під силу підтвердити припущення, що думка є матеріальною і що матерія зароджується з інформації. Неправильне використання вірусів може завдати непередбачуваної шкоди, а розумне їх застосування здатне породити нове покоління ЕОМ.

Список літератури:

1. Haris A. Khan, Ali Syed, Azeem Mohammad, Malka N. Halgamuge. Computer Virus and Protection Methods Using Lab Analysis. IEEE II International Conference on Big Data Analysis. 2017. P. 882–886.
2. Zhu Q., Yang X., Ren J. Modeling and analysis of the spread of computer virus. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2012. № 17 (12). P. 5117–5124.
3. Pham D.V., Syed A., Halgamuge M.N. Universal serial bus based software attacks and protection solutions. Digital Investigation. 2011. № 7 (3). P. 172–184.
4. Pham D.V., Halgamuge M.N., Syed A., Mendis P. Optimizing windows security features to block malware and hack tools on USB storage devices. Progress in electromagnetic research symposium. 2010. P. 350–355.
5. Vargas V., Syed A., Mohammad A., Halgamuge M.N. Pentaho and Jaspersoft: A Comparative Study of Business Intelligence Open Source Tools Processing Big Data to Evaluate Performances. Int. Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). 2016. Vol. 7. № 10. P. 20–29.
6. Cohen F. Computer viruses: theory and experiments. Computers and Security. 1987. Vol. 6. P. 22–35.
7. Cohen F. Computational aspects of computer viruses. Computers and Security. 1989. Vol. 8. P. 325–344.
8. “Friendly” Welchia Worm Wreaking Havoc. URL: <http://www.internetnews.com/ent-news/article.php/3065761/Friendly+Welchia+Worm+Wreaking+Havoc.htm/>
9. Andrew LB Decay: Bacterial Computing. URL: <http://andrewlb.com/2014/04/decay-bacterial-computing/>.
10. Computer viruses vs biological viruses. URL: <http://www.sciencein africa.com/microbiology/>.

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Проанализирована эволюция и природа компьютерных вирусов. Рассмотрено аналогиию между компьютерными и биологическими экосистемами. Выделены основные различия между биологическими и компьютерными вирусами. Рассмотрены возможные направления использования знаний об иммунной системе человека и механизмы борьбы с болезнями для укрепления устойчивости компьютерных систем к действию различного типа компьютерных вирусов. На основе аналогии компьютерных вирусов с живыми экосистемами выделено перспективы развития новых технологий для поддержания оптимального функционирования компьютерных систем и сетей.

Ключевые слова: *информационная безопасность, компьютерный вирус, вредоносное программное обеспечение, антивирусная программа, уязвимости, аналогия, операционная система, BLAST, Welchia, ДНК, РНК, биологическая экосистема, репликация, инфицирование, иммунитет.*

SOME SECURITY QUESTIONS IN INFORMATION SYSTEMS

The evolution and nature of computer viruses are analyzed. The analogy between computer and biological ecosystems is considered. The main differences between biological and computer viruses are highlighted. Possible directions of use of knowledge about the human immune system and mechanisms of struggle against illnesses for strengthening of stability of computer systems to action of various type of computer viruses are considered. Based on the analogy of computer viruses with living ecosystems, the prospects of the development of new technologies for maintenance of optimal functioning of computer systems and networks are highlighted.

Key words: *information security, computer virus, malware, antivirus program, vulnerabilities, analogy, operating system, BLAST, Welchia, DNA, RNA, biological ecosystem, replication, infection, immunity.*

Комлева Н.О.

Одеський національний політехнічний університет

АДАПТИВНЕ УПРАВЛІННЯ СИСТЕМОЮ НАВЧАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ «HANDY SOFT MAKER»

У роботі проведено аналіз сучасних засобів адаптивного навчання та сформульовано вимоги до автоматизованого навчального комплексу «Handy Soft Maker» для вивчення мови програмування C/C++. Навчальний комплекс складається з системи навчання, інтелектуальної вирішальної системи та системи контролю. Система навчання містить модуль управління контентом, редактор коду, блок управління програмними шаблонами та довідковий модуль. Інтелектуальна вирішальна система порівнює ключові моменти створеної учнем програми з оригіналом, що надається викладачем, з використанням методології синтаксичних дерев, і робить висновок щодо коректності рішення. Система контролю комплексу «Handy Soft Maker» дозволяє автоматизувати вибір студентом наступного завдання, виходячи з характеристик і якості вирішення студентом поточного завдання, згідно з методикою Stradaptive.

Ключові слова: адаптивне управління, програмоване навчання, автоматизований програмний комплекс.

Постановка проблеми. Під програмованим навчанням розуміється система навчальної роботи з переважно опосередкованим програмним управлінням пізнавальною діяльністю учнів. Зростання інформації у цей час досягає таких темпів обсягу, що звичайні методи її організації та подачі ведуть до надмірного перевантаження учнів відомостями, до поверхневого засвоєння фактів і, як наслідок, до зниження якості навчання [1, с. 194]. У програмованому навчанні не тільки робиться великий наголос на активізації самостійної пізнавальної діяльності учнів, а й пропонуються нові ефективні методи та засоби для гнучкого керування цією діяльністю. Використання спеціальних навчальних програм істотно знижує потік інформації від індивідуального педагога до учня, значно полегшує керуваність і піднімає ефективність навчання. Завдяки зменшенню потоку інформації від індивідуального педагога до учнів та істотного збільшення цього потоку від навчальної програми значно підвищується рівень навчання, скорочується час і розкид в успішності різних учнів.

Адаптивне навчання й адаптивний тестовий контроль у своїй єдності становлять сучасний комп'ютерний варіант реалізації принципу індивідуалізації навчання з використанням замкнутої автоматизованої навчальної системи [2, с. 205]. Адаптивне навчання дозволяє: використовувати оцінки, отримані шляхом попереднього адаптивного тестового контролю, для вибору вихідних

тематичних блоків навчальної інформації, з якої починається адаптивне навчання; забезпечити передачу знань, формування умінь і навичок без пробілів, отримуючи необхідну структуру і бажаний рівень знань, умінь, навичок.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення результативності процесу навчання мови програмування C/C++ шляхом застосування автоматизованого підходу до контролю цього процесу з використанням адаптивного управління.

Виклад основного матеріалу дослідження. Важливо провести суттєве розділення двох понять, які часто змішуються: програмування змісту навчання і програмування засвоєння. Часто, говорячи про програмоване навчання, обмежують його методичні можливості першим аспектом. Таке обмеження дає можливість вирішувати проблеми навчання лише наполовину: складання логічних планів змісту навчального предмета, алгоритмізація елементів змісту, відбір навчального матеріалу та ін. Очевидно, що навчальне програмування, або створення навчальної програми, повинне бути засновано на програмуванні змісту навчання і процесу його засвоєння [3, с. 54].

Програмні засоби навчального призначення за принципами використання можна умовно розділити на навчальні системи, що містять знання з конкретної предметної області, й інструментальні системи, призначені для наповнення їх знаннями

з довільної предметної області з метою створення навчальної системи. Найбільш перспективними з погляду співвідношення кінцевого результату і трудовитрат на створення і підтримку є інструментальні системи, які прийнято називати інтелектуальними комп'ютерними навчальними системами (далі – ІКОС) [4, с. 24]. До основних переваг ІКОС належать: можливість використання переваг індивідуального навчання; інтенсифікація навчання; можливість індивідуальної адаптації курсу навчання до потреб учнів або умов навчання; підвищення доступності освіти; навчання навичкам самостійної роботи; розвантаження викладача від ряду рутинних, повторюваних дій (читання лекцій, перевірки контрольних робіт і т. д.); можливість проведення в рамках дистанційного навчання/перенавчання та підвищення кваліфікації. Особливий інтерес становлять інтелектуальні комп'ютерні навчальні програми, які: розраховані на низький рівень попередніх знань учня; дозволяють ефективно управляти процесом навчання; автоматизують рутинні процеси зі створення програми шляхом застосування попередньо визначених програмних шаблонів.

Було розглянуто характеристики ряду програмних аналогів, націлених на автоматизацію процесу навчання, а саме AVELife TestGold Studio, Blackboard Learning System, E-Learning Catalog, Ellekta, Codecademy, JavaRush. За результатами аналізу зроблено висновок про необхідність розробки власного програмного комплексу для навчання мові програмування C/C++.

Із програмним комплексом можуть працювати дві категорії користувачів – Вчитель (створює завдання і їх теговий опис, управляє програмними шаблонами та довідковим матеріалом) та Учень (складає тексти програм згідно з наданим завданням із використанням вбудованих у систему програмних шаблонів, користується довідковою системою). Всі завдання, запропоновані учню, повинні бути угруповано для систематизації їх за такими ознаками:

- 1) основна тема програмного завдання;
- 2) перелік тем, які попередньо повинні бути пройдені учнем;
- 3) перелік вбудованих у систему програмних блоків (шаблонів), необхідних для вирішення завдання;
- 4) рівень складності;
- 5) ваговий коефіцієнт складності програмного завдання.

Розглянемо узагальнену структуру інтелектуального навчального комплексу «Handy Soft

Maker» (рис. 1). Основним завданням комплексу є створення автономного автоматизованого робочого місця для вивчення мови програмування на прикладі C/C++. Завдяки роботі системи навчання учневі надаються завдання, який попередньо створив вчитель і завантажив у БД комплексу. Надалі для зберігання завдань планується використання хмарних технологій.

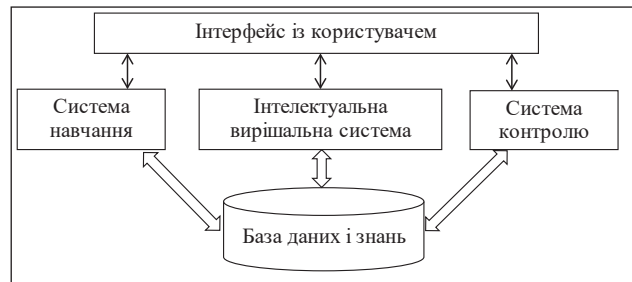


Рис. 1. Узагальнена структурна схема програмного комплексу «Handy Soft Maker»

Отримавши завдання, учень створює програму, користуючись запропонованим йому програмним шаблоном. Після збереження написаної учнем програми аналізуються її ключові моменти. Інтелектуальна вирішальна система порівнює ключові моменти створеної учнем програми з оригіналом, що надається викладачем, із використанням методології синтаксичних дерев, і робить висновок щодо коректності рішення. Детальний розгляд функціонування вирішальної системи виходить за рамки цієї статті.

Отримавши оцінку за створення програми від інтелектуальної вирішальної системи, система контролю формує рекомендацію щодо наступного завдання. Проходження всього курсу автоматизованого навчання гарантує придбання учнем певних навичок із програмування мовою C/C++ без зайвого навантаження на викладача та може використовуватися як додатковий навчальний засіб. Структурну схему системи навчання зображено на рис. 2.

Згідно з картою курсу, викладач наповнює систему контентом, тобто завданнями з супутнім описом. У процесі розробки програми учневі надаються: програмний шаблон із загальним «каркасом» програми; перелік операторів, які доцільно використовувати у тексті програмного коду; загальні можливості мови програмування C/C++ – типи даних, оператори вводу – виводу, заголовки функцій, арифметика обчислень, умовний оператор, оператори циклів та ін. Надання цих можливостей націлено на оптимізацію процесу навчання, тобто автоматизацію тих процесів,

які вже є знайомими та ручне виконання яких не підвищує кваліфікацію програміста.

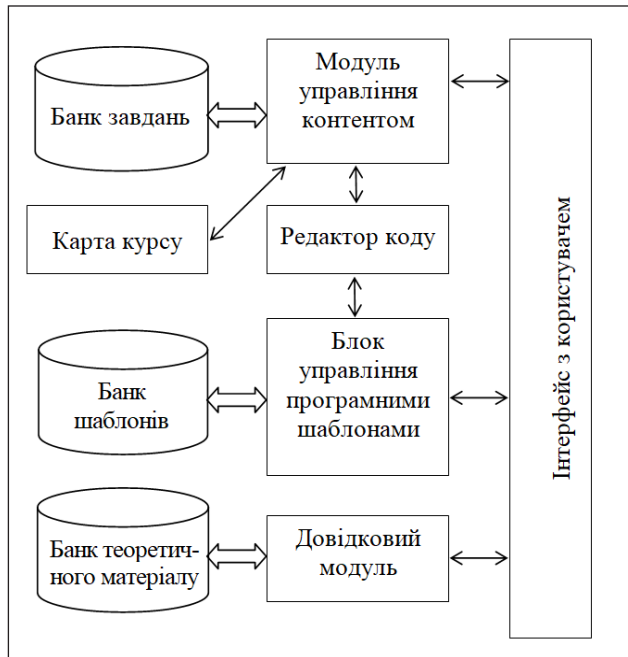


Рис. 2. Структурна схема системи навчання

Призначенням процесу управління є забезпечення рішення задачі, тобто максимально ефективного навчання, за це відповідає система контролю (рис. 3). За базу кваліфікаційну ознаку побудови управління системою навчання, яка визначає її вигляд і потенційні можливості, в роботі прийнятий спосіб організації контуру управління (рис. 4). У якості варіанта проведення адаптивного тестування обрано методику Stradaptive – тестування проводиться на основі бази складності завдань, де всі завдання попередньо розділені на рівні складності [5, с. 7]. Після правильного виконання наступне завдання береться з більш високого рівня складності, після неправильного – навпаки. Це вимагає попереднього визначення складності всіх завдань.

Завдання прийняття рішень (далі – ПР) виникає, коли присутні кілька варіантів дій (альтернатив) для досягнення заданого або бажаного результату. Потрібно вибрати найкращу в певному сенсі альтернативу.

Загальну постановку задачі прийняття рішень, що розуміється як завдання вибору з деякої множини, можна сформулювати таким чином.

Нехай X – множина альтернатив, Y – множина можливих наслідків (результатів) (X і Y – довільні абстрактні множини). По-перше, передбачається існування причинного зв'язку між вибором деякої альтернативи $x_i \in X$ і настанням відповідного

результату $y_i \in Y$. Крім того, передбачається наявність механізму оцінки якості такого вибору – зазвичай оцінюється якість результату. Потрібно вибрати найкращу альтернативу, для якої відповідний результат має найкращу оцінку якості.

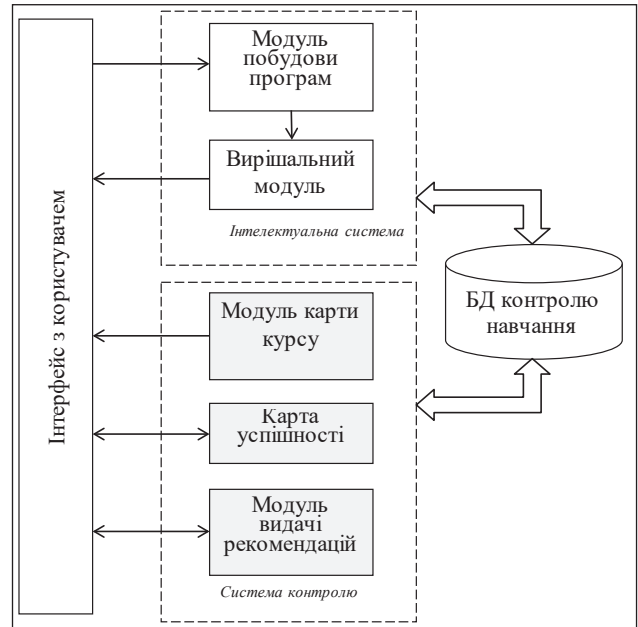


Рис. 3. Система контролю

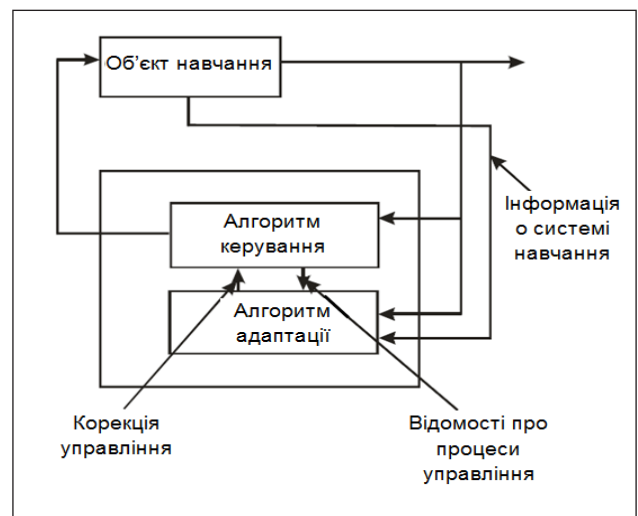


Рис. 4. Адаптивне управління системою навчання

Другий важливий момент загального завдання ПР полягає у вивченні (завданні) системи переваг особи, що приймає рішення (далі – ОПР). Другий момент ніяк не пов'язаний з першим, і різні способи завдання системи переваг можуть бути реалізовані для кожного виду зв'язку альтернатив із наслідками. У певному сенсі найпростіша ситуація виникає, коли кожен результат можна оцінити конкретним дійсним числом відповідно до

деякого заданого відображення: $f: Y \rightarrow R$. У цьому разі порівняння результатів зводиться до порівняння відповідних їм чисел, наприклад, результат u_i може вважатися кращим, ніж u_j , якщо $f(u_i) > f(u_j)$ (завдання максимізації). Результати еквівалентні, якщо $f(u_i) = f(u_j)$. Така функція називається цільовою функцією управління f .

Мова бінарних відносин – друга, більш загальна, ніж критеріальна, мова опису системи переваг ОПП. Передбачається, що кожна пара виходів u_i, u_j може перебувати в одних із таких відносин:

- u_i переважає над (строго домінує) u_j ;
- u_j переважає над u_i ;
- u_i переважає не менше (не строго домінує), ніж u_j ;
- u_j переважає не менше, ніж u_i ;
- u_i еквівалентний u_j ;
- u_j еквівалентний u_i ;
- u_i та u_j не можна порівнювати між собою.

Значення функцій управління для окремих завдань визначається на підставі наявності та складності взаємозв'язків присутніх у них блоків інформації (оператори мови програмування, алгоритми, типізація і т. д.). Конкретні значення функцій управління для задач призначаються викладачем (фахівцем у предметній області).

Під час вирішення задачі управління процесом навчання значення функції управління задається щодо початку теми, тобто в рамках теми завдання,

що має більше значення функції управління і є більш складним, ніж завдання, яке має менше значення функції, і навпаки. Завдання з однаковими значеннями функції рівноцінні, тобто еквівалентні, будь-яке з них буде обраним у процесі навчання. Завдання з різних тем неможливо порівнювати за значенням функції управління. Значення функції керування визначається на базі обраного з карти успішності студента завдання (рис. 5).

Відповідно до прийнятої методології, послідовність тематичних блоків навчальної інформації (далі – НІ) залежить від їх складності, яка визначається співвідношенням декларативної і процедурної складових частин. Чим більше процедурної частини в тематичному блоці НІ, тим вища її складність і тим далі в курсі вона розташована.

Послідовність проходження тематичних блоків у загальному вигляді представлена на рис. 6. Для вибору наступного завдання система контролю процесу навчання аналізує значення таких параметрів:

1) оцінка, яку отримав студент за вирішення поточного (останнього) завдання. Ця оцінка виставляється інтелектуальною системою за п'ятибальною шкалою від «1» до «5». Відповідно це приводить до запуску одного з режимів: «Режим 1», ..., «Режим 5»;

2) порядковий номер поточної теми $T(i)$. Це потрібно для того, щоб визначати завдання з тієї ж

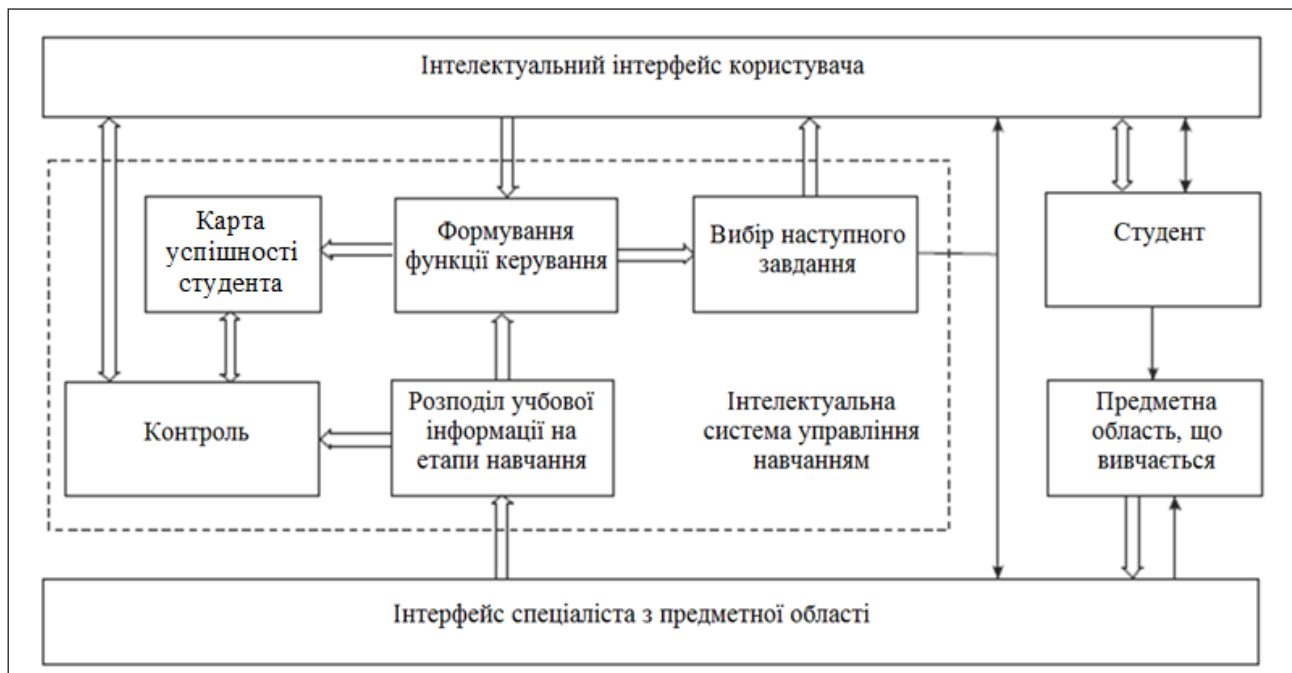


Рис. 5. Структурна модель системи керування навчанням

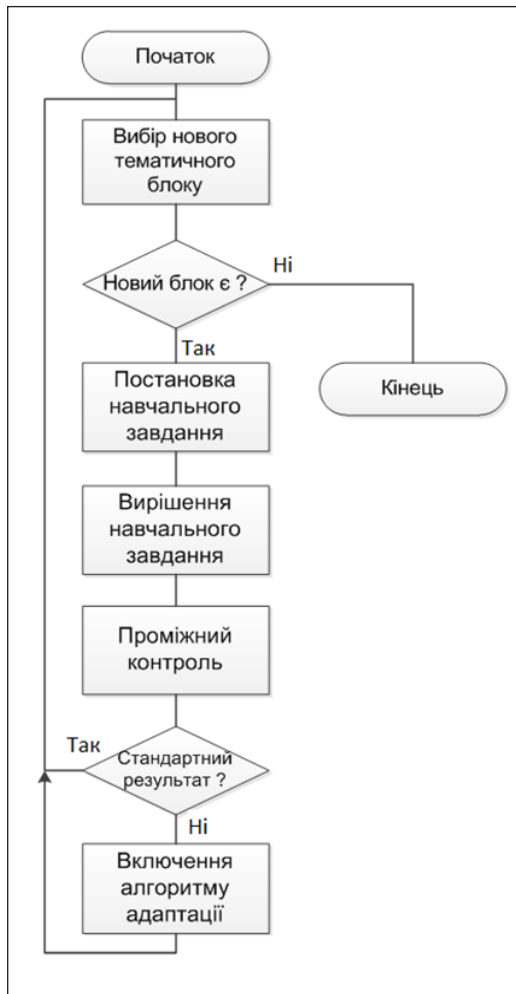


Рис. 6. Загальний алгоритм проходження тематичних блоків

теми, або переходити на попередню тему за наявності такої;

3) значення категорії поточного (останнього) вирішеного завдання: С1 – просте, С2 – середнє, С3 – складне завдання.

Надалі, з розвитком комплексу, можна аналізувати успішність проходження декількох останніх завдань чи тем або взагалі врахову-

вати історію всього процесу навчання студента під час вибору наступного завдання, що, звичайно, значно підвищує складність процесу керування. З переліку режимів «Режим 4» відповідає стандартному режиму керування, а «Режим 1», «Режим 2», «Режим 3» та «Режим 5» – адаптації процесу навчання до поточної успішності студента. Більш детальний опис режимів виходить за рамки статті. Найбільш цінною функцією системи керування процесом навчання є видача рекомендації щодо вибору наступного завдання, що призводить до підвищення ефективності процесу навчання.

У виборі засобів для розробки інтерфейсу комплексу перевага була віддана технології JavaFX, яка забезпечує створення потужного графічного інтерфейсу користувача (GUI) для великомасштабних програм, орієнтованих на обробку даних, насичених медіапрограм, що постачають різноманітний медіаконтент користувачеві, Mashup-додатків, які об'єднують різні Web-ресурси для користувача, компонентів високоякісної графіки й анімації. Тому це є досить доцільним у розробці навчального комплексу, який може надалі містити різноманітний контент для підвищення наочності процесу навчання. Однією з головних переваг цієї технології є легкість її розробки: програміст може змінювати XML (FXML) документ, редагувати вид вікна в спеціальній програмі SceneBuilder, але також є можливість розробки інтерфейсу в кодї [6, с. 118].

Висновки. Використання програмного комплексу «Handy Soft Maker» з адаптованим управлінням системою навчання дозволяє покращити роботу щодо навчання учнів мові програмування C/C++. Час, який витрачає викладач на безпосереднє спілкування з учнем, зменшується приблизно в 5 разів. Програмний продукт дозволяє автоматизувати процес навчання мові програмування C/C++ і зробити цей процес більш легким та індивідуальним. Надалі планується розширення банку шаблонів системи навчання для підвищення гнучкості написання учнем програм.

Список літератури:

1. Демьянов А.В., Юрков Н.К., Трусков В.А. К проблеме синтеза модели обучаемого интеллектуальной компьютерной обучающей системы. Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий: материалы науч.-практ. конф. М., 2013. С. 193–196.
2. Зайцева Л.В. Методы и модели адаптации к учащимся в системах компьютерного обучения. Educational Technology & Society. 2013. № 6 (4). P. 204–211.
3. Бухаров М.Н. Практическая теория компьютерного обучения, деловые игры и экспертные системы. Киев: Вестник знаний, 2012. 211 с.
4. Лапшин Э.В., Блинов А.В., Юрков Н.К. Информационные модели проектирования интеллектуальных тренажеров широкого профиля. М.: Измерительная техника. 2000. № 8. С. 23–27.

5. Андреев А.Н., Блинов А.В., Юрков Н.К. Концептуальный подход к внедрению информационных технологий в области. Измерительная техника. 2009. № 5. С. 7–11.
6. Старыгин А.В. Java+XML. М.: «Эксмо», 2014. 527 с.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ОБУЧЕНИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА «HANDY SOFT MAKER»

В работе проведен анализ современных средств адаптивного обучения и сформулированы требования к автоматизированному учебному комплексу «Handy Soft Maker» для изучения языка программирования C/C++. Учебный комплекс состоит из системы обучения, интеллектуальной решающей системы и системы контроля. Система обучения содержит модуль управления контентом, редактор кода, блок управления программными шаблонами и справочный модуль. Интеллектуальная решающая система сравнивает ключевые моменты созданной учеником программы с оригиналом, предоставляемой преподавателем, с использованием методологии синтаксических деревьев, и делает вывод о корректности решения. Система контроля комплекса «Handy Soft Maker» позволяет автоматизировать выбор студентом следующего задания, исходя из характеристик и качества решения студентом текущего задания, по методике Stradaptive.

Ключевые слова: адаптивное управление, программируемое обучение, автоматизированный программный комплекс.

ADAPTIVE CONTROL OF THE TEACHING SYSTEM OF THE SOFTWARE COMPLEX “HANDY SOFT MAKER”

The article analyzes the modern means of adaptive learning and formulates the requirements for the “Handy Soft Maker” automated learning complex for studying the programming language C/C++. The training complex consists of the system of training, the intelligent decision system and the system of control. The training system contains the content management module, the code editor, the programmatic template management unit, and the help module. The intellectual decisive system compares the key points created by the student with the original provided by the teacher using the syntax tree methodology and concludes that the solution is correct. The system control of the complex “Handy Soft Maker” allows automating the student’s choice of the next task, based on the characteristics and quality of the student’s decision on the current task, according to the Stradaptive method.

Key words: adaptive management, programmable learning, automated software complex.

УДК 004.89+004.912+004.5+004.93'1+519.7

Коротенко Г.М.

Национальный технический университет
«Днепровская политехника»

Коротенко Л.М.

Национальный технический университет
«Днепровская политехника»

Харь А.Т.

Национальный технический университет
«Днепровская политехника»

ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ЗАДАЧАХ СОЦИАЛЬНО-ГИГИЕНИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В статье исследуются методики описания и анализа загрязняющих веществ техногенного происхождения для создания специализированной онтологии, выступающей в качестве концептуальной модели процесса классификации химических веществ техногенного происхождения. Описываются структура предметной области, компонентный состав, уровни взаимодействия и возможные связи такой онтологии.

Ключевые слова: здоровье населения, техногенное влияние, экологические факторы, химические вещества, социально-гигиенический мониторинг, онтологии.

Постановка проблемы. Сложное экологическое положение и высокий уровень заболеваемости населения Украины заставляют медиков и экологов искать новые пути улучшения качества здоровья граждан, важное место среди которых занимают исследования средств снижения риска, связанного с вредным воздействием загрязнения окружающей среды. По данным ВОЗ (63 сессия Всемирной ассамблеи здравоохранения, п. 11.18 предварительной повестки дня от 25 марта 2010 г. (A63/21)), более 25% заболеваний мирового населения обусловлено экологическими факторами, в т. ч. воздействием химических веществ техногенного происхождения [1, с. 1]. В общем контексте ООН рассматривает вопрос защиты «здоровья человека» [там же] на основе регулирования химических веществ с точки зрения сектора здравоохранения. Статистические данные показывают, что от непреднамеренных отравлений ежегодно умирают примерно 355 тыс. человек, причем две трети случаев смерти наблюдаются в развивающихся странах [1, с. 2]. Медико-санитарные вопросы и роль сектора здравоохранения в Стратегическом подходе к международному регу-

лированию химических веществ на пути к достижению цели 2020 г. и на последующий период задекларированы ВОЗ в качестве одного из основных направлений работы по укреплению здоровья населения Земли [2, с. 1].

Анализ последних исследований и публикаций. Крупные промышленные мегаполисы имеют развитую инфраструктуру и являются местонахождением большого количества промышленных объектов. Поскольку наличие промышленного производства является прямой предпосылкой для возникновения техногенно-гигиенического риска здоровью населения индустриальных городов [3, с. 139], возникает необходимость усовершенствования методики описания и анализа загрязняющих веществ техногенного происхождения.

Согласно данным [4, с. 99], независимыми международными организациями официально зарегистрировано более 600 наименований подобных веществ, однако информация о них зачастую является разнородной, разноформатной и содержится, как правило, в большом количестве различных источников. Современные города выбрасывают в атмосферу и водную среду около 1 000 хи-

мических соединений [5, с. 23]. По данным работы [6, с. 3], в 1985 г. в мире было зарегистрировано семимиллионное вещество, а в настоящее время насчитывается более 20 млн индивидуальных химических веществ. В соответствии с другими данными, по документам ООН, на 2010 г. в международной системе CAS было зарегистрировано более 50 млн химических веществ. При этом из их общего количества исследовано меньше 1%. Сегодня Европейское химическое агентство (ЕХА) вынуждено констатировать ситуацию, при которой «каждый 3 случай заболевания людей в ЕС вызван факторами химической этиологии. Ежегодно около 5 млн человек умирают от воздействия опасных химикатов [7, с. 1]. Авторы доклада обращают внимание на огромные экономические потери в результате химической опасности, особенно в развивающихся странах. Предполагается, что между 2005 и 2020 гг. заболевания и травмы, связанные с использованием пестицидов в сельском хозяйстве в странах Африки к югу Сахары, могут обернуться потерями в размере \$90 млрд. Кроме того, согласно данным доклада, в настоящее время в мировом обиходе находится примерно 140 тыс. химических веществ. Лишь часть из них тщательно исследована на предмет возможного воздействия на здоровье человека и окружающую среду. Таким образом, возникает необходимость использования компьютерных технологий объединения знаний из различных информационных ресурсов в виде баз данных и знаний, онтологий знаний и предметных областей, т. н. метаонтологий [8, с. 1].

Однако на сегодняшний день на Украине не существует баз знаний химических веществ техногенного происхождения, также как и онтологий, которые могли бы выступить основой для подобных баз знаний.

Постановка задания. Целью данной работы является построение и описание структуры специализированной онтологии, выступающей в качестве концептуальной модели процесса классификации химических веществ техногенного происхождения, создающих многочисленные риски здоровью населения [9, с. 12; 10, с. 8].

Изложение основного материала исследования. При разработке интеллектуальных систем, основанных на знаниях, зачастую используются онтологии предметных областей (далее – ПО), которые представляют собой набор определенных понятий ПО и их взаимосвязей. В настоящее

время разработаны онтологии и их модели для различных предметных областей. В качестве примеров можно привести модели онтологии физической и органической химии, некоторых разделов аналитической химии [11, с. 84], оптимизирующих преобразований программ [12, с. 90] и медицинской диагностики [13, с. 244].

Онтология, описывающая конкретную предметную область, включает в себя совокупность терминов и отношений, семантически значимых для данной предметной области, а также правил, согласно которым можно строить утверждения об элементах ПО. Для каждого термина онтология задает объем обозначенного им понятия. Все множество терминов онтологии можно условно разделить на две группы: термины, которые используются при формализации знаний (онтология знаний) и термины, используемые при задании входных и выходных данных решаемых с помощью онтологии задач (онтология действительности) [14, с. 6; 15, с. 8; 16, с. 9]. Существуют также онтологии, в которых присутствуют только термины, принадлежащие к одной из вышеописанных групп.

Онтологию химии, как и любую онтологию, можно представить в виде системы понятий знаний (далее – СПЗ) и системы понятий действительности (далее – СПД) (рис. 1).

Термины СПЗ химии используются при описании значений свойств химических элементов, химических веществ и реакций. Множество значений терминов СПЗ входит в базу знаний химии, которая, кроме этих значений, содержит также множество законов химии, представленных в виде логических утверждений. В каждом разделе химии (физическая, неорганическая, аналитическая, органическая и т. д.) рассматриваются различные свойства элементов, веществ и реакций.

Определение многоуровневых онтологий. Сложно структурированные предметные области, к которым относится техноэкология¹, имеют иерархическое строение, как с последовательным, так и с параллельным расположением подразделов. В данном случае отдельные разделы онтологии подобной ПО имеют сходную структуру, для определения которой может использоваться онтология более высокого уровня общности (онтология онтологий).

В свою очередь, между онтологиями более высоких уровней общности также может наблюдаться сходство, которое может быть описано в терминах онтологий еще более высокого уровня [3, с. 140].

¹ Техноэкология – наука о техногенных факторах влияния на окружающую среду.

В онтологии знаний техноэкологии можно выделить следующие разделы (рис. 1): «Антропогенное воздействие на окружающую среду» и «Техногенно-экологический мониторинг». Раздел «Антропогенное воздействие на окружающую среду» включает в себя «Загрязнение атмосферы», «Загрязнение гидросферы», «Загрязнение литосферы», «Акустическое и электромагнитное загрязнение», «Радиационное загрязнение», «Антропогенное воздействие на экосистемы». Раздел «Техногенно-экологический мониторинг», в свою очередь, состоит из подразделов «Экологический мониторинг», «Социально-гигиенический мониторинг», «Экологический аудит и экспертиза», «Экологическая сертификация», «Анализ риска», «Технические средства защиты от антропогенных загрязнений», «Технологии обращения с промышленными отходами». Рассмотрим в качестве примера подраздел

«Загрязнение атмосферы», включающий области «Физическое загрязнение атмосферного воздуха», «Химическое загрязнение атмосферного воздуха», «Нормирование качества атмосферного воздуха». Однако подраздел «Загрязняющие вещества техногенного происхождения» одновременно относится и к областям «Анализ риска» и «Социально-гигиенический мониторинг» раздела «Техногенно-экологический мониторинг», поскольку различные категории терминов (рис. 1), одновременно описывающих одни и те же химические вещества, относятся также и к различным подразделам онтологии (к примеру, классификации загрязняющих веществ).

Существуют и другие множества терминов, которые обладают некоторыми общими свойствами. Поэтому правомерным является вывод о существовании онтологии второго уровня, которая является результатом анализа онтологии первого уровня. Эта

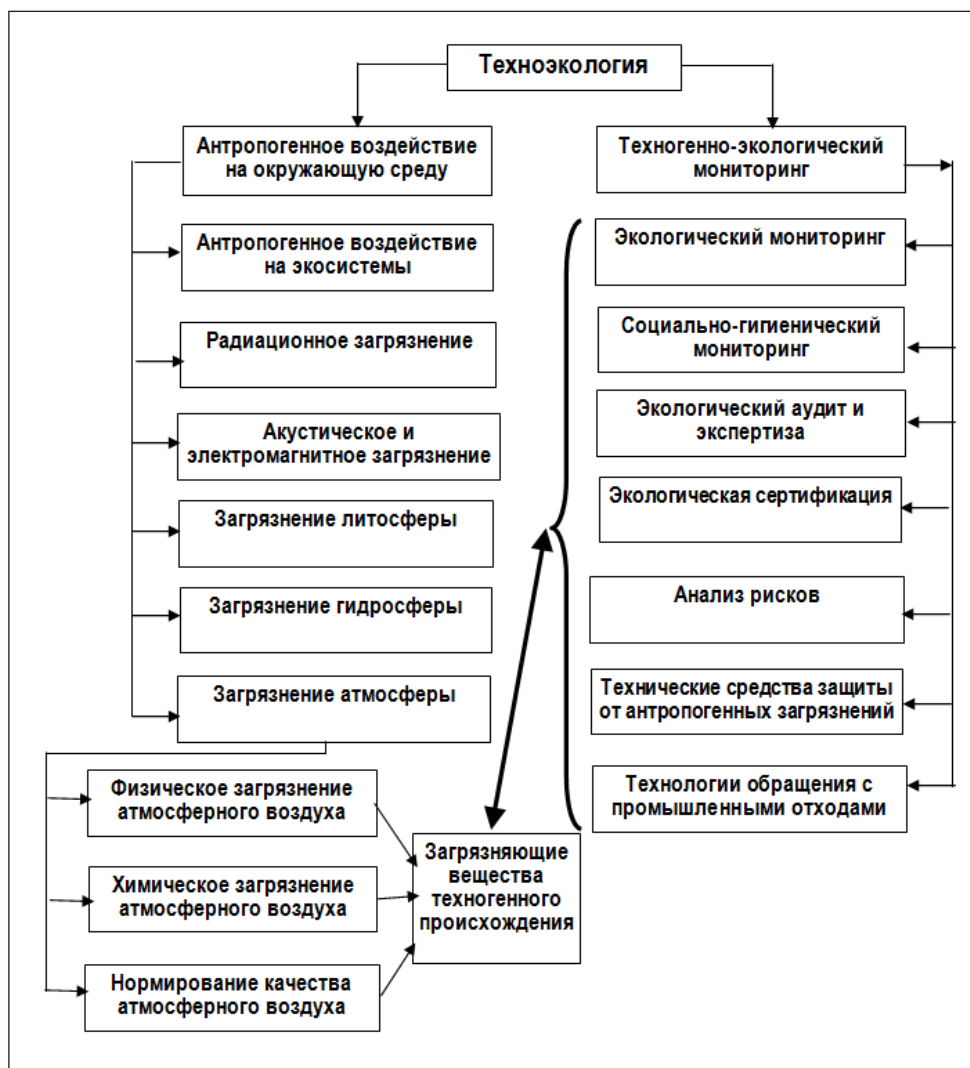


Рис. 1. Фрагмент структурной схемы онтологии предметной области «Техноэкология»

онтологія, по суті, являється онтологією онтології першого рівня. Її терміни визначають множини і властивості елементів цих множин. Наприклад, для розглянутого прикладу онтологія другого рівня буде містити терміни «класи хімічних речовин», «заборонючі списки», «токсикологічні класи» і т. д.

Перехід до наступного рівня відбувається тим же способом: якщо в онтології другого рівня існують терміни, що мають певну загальну властивість, то можна ввести термін, що позначає множину, до якої належать ці терміни. Терміни онтології вищого рівня будуть задавати імена більш загальним множинам понять. Для розглянутого прикладу такими термінами можуть бути терміни «власні властивості сутностей» (множина функцій, область визначення яких є множиною сутностей певного типу, а область значень залежить від терміна, що задає назву властивості). В цьому випадку також з'являються терміни, що позначають допоміжні поняття. В розглянутому прикладі таким терміном є термін «типи сутностей», який позначає множину назв типів сутностей (їх значення можуть бути терміни «хімічні елементи», «хімічні речовини» і т. д.).

Перехід до онтології вищого рівня дозволяє описати більш загальні властивості предмет-

ної області. Перехід від онтології вищого рівня до онтології нижчого рівня відбувається за допомогою зазначення термінів, що належать до множин, позначених термінами онтології вищого рівня.

Для цієї предметної області була розроблена трьохрівнева онтологія. Її структура наведена на рис. 2.

Прикладами термінів онтології третього рівня є наступні терміни: типи сутностей, сутності, власні властивості сутностей, спільні властивості сутностей. Кожен тип сутностей представляє собою певну множину сутностей; кожна сутність може мати ім'я, бути представлена числом, бути логічним значенням або кортежем значень.

Множини сутностей різних типів не перетинаються. Характеристикою кожної сутності є її тип. Кожна сутність може мати свій набір власних властивостей. Онтологія другого рівня представляє собою множину онтологій розділів, т. є. представляє собою сукупність модулів, що відповідають розділам. Терміни онтології розділу – це представники множин термінів онтології хімії. Наприклад, для органічної хімії сутності бувають хімічними елементами, речовинами, органічними сполученнями, реакціями і т. д. Онтологія першого рівня



Рис. 2. Структура подраздела «Загрязняющие вещества техногенного происхождения»

для каждого раздела представляет собой множество онтологий подразделов – модулей онтологии первого уровня. Каждый модуль онтологии первого уровня содержит определение связанных множеств терминов. Например, в онтологии первого уровня для физической химии [17, с. 39; 18, с. 282; 19, с. 143; 19, с. 3] могут быть выделены следующие модули: «Элементы», «Вещества», «Реакции», «Основы термодинамики», «Термодинамика. Химические свойства», «Термодинамика. Физические свойства», «Термодинамика. Связь физических и химических свойств», «Химическая кинетика». В первых трех модулях определяются термины, описывающие свойства сущностей соответствующего типа. В модуле «Основы термодинамики» определены термины, используемые при описании общих свойств термодинамических систем и их компонентов. Состояния термодинамической системы могут изменяться в ходе физико-химического процесса. Состояния процесса задаются в дискретные моменты наблюдения. В разделе «Термодинамика. Физические свойства» определены термины, используемые при описании фазовых превращений веществ в ходе процесса, без учета химических превращений. В разделе «Термодинамика. Химические свойства» определены термины, используемые при описании химических превращений веществ в ходе процесса, без учета фазовых превращений. И, наконец, в разделе «Термодинамика. Связь физических и химических свойств» определены термины, используемые при описании физико-химических процессов. В разделе «Химическая кинетика» определены термины, описывающие динамику прохождения процессов.

Таким образом, модули онтологии первого уровня определяют свойства сущностей каждого типа. Схема определения свойства фиксируется в онтологии третьего уровня. Конкретный набор сущностей каждого типа, а также значения их свойств задаются в знаниях раздела. Знания также имеют модульную структуру [8, с. 2]. Деление знаний на модули совпадает с делением на модули онтологии первого уровня.

Выводы. Разработка и создание онтологии химических веществ техногенного происхождения

может выступить инструментом повышения эффективности оценки многофакторных негативных воздействий техногенной среды на организм человека и определения множества результирующих факторов подобных воздействий.

Также это позволит повысить точность проведения разнообразных оценок воздействия химических веществ на здоровье субъектов исследования в процессе решения задач оценки рисков разнообразных заболеваний населения, а также проведения не только социально-гигиенического и экологического, но и многих других видов мониторинга.

Как следует из определения, многоуровневая онтология предметной области является модульной. Модуль онтологии определяет связанные между собой термины, которые могут относиться к одному разделу данной ПО либо образовывать связанную систему понятий данной ПО, которая может использоваться при определении других систем понятий этой же ПО. Деление онтологии на модули позволяет получить структурированное описание онтологии сложной ПО. Модульность онтологии делает ее описание легко модифицируемым: при изменении связанных понятий достаточно изменить их определение только в одном модуле. Кроме того, добавление новых понятий происходит посредством добавления новых модулей. Добавление новых разделов также сводится к добавлению новых модулей в соответствующую онтологию. Модульность онтологии ПО влечет за собой модульность знаний ПО. При этом одному модулю онтологии ПО может соответствовать один модуль знаний ПО. Такое свойство онтологии позволяет создавать интеллектуальные системы, в которых могут изменяться как знания, так и онтологии. Редакторы онтологий следующего уровня могут строиться по онтологии предшествующего уровня. В настоящее время методы создания таких редакторов существуют [21, с. 49]. Онтология высокого уровня определяет все множества терминов, которые существуют в предметной области, и задает свойства терминов из этих множеств. Таким образом, с использованием имен множеств могут быть даны формулировки всех классов задач, решаемых в предметной области, и разработаны методы решения этих задач.

Список литературы:

1. Стратегический подход к международному регулированию химических веществ. Доклад секретариата. 2010. URL: http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/4859/A63_21-ru.pdf;jsessionid=C7D92489723866751E918DA3DB0B7CBC?sequence=1.
2. Предварительная повестка дня Семидесятой сессии Всемирной ассамблеи здравоохранения и сроки и место проведения Сто сорок первой сессии Исполнительного комитета. 2017. URL: http://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/EB140/B140_44-ru.pdf.

3. Коротенко Л.М., Коротенко Г.М., Харь А.Т. Перспективы применения онтологических моделей для повышения эффективности анализа экологических и других взаимосвязанных с ними рисков. Матеріали ІІІ Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю (Вінниця, 21–24 вересня 2011 р.). Т. 1. Вінниця: ВНТУ, 2011. С. 139–141.
4. Щербань Н.Г., Мясоєдов В.В., Шевченко Е.А., Савченко В.Н. Методические аспекты использования методологии оценки риска здоровью населения при воздействии факторов окружающей среды в Украине и России. Вестник Харьковского национального университета имени В.Н. Каразина. Серия «Медицина». 2010. Вып. 19 (898). С. 97–103.
5. Хавкина Т.К. Химико-физическое загрязнение окружающей среды и его последствия для человека (терато-мута-канцерогенез). Саратов: 2013. 320 с.
6. Лепешко П.Н., Бондаренко Л.М. Токсиколого-гигиеническая оценка новых химических веществ, внедряемых в производство: учеб.-метод. пособ. Минск: 2017. 55 с.
7. Ежегодно около пяти миллионов человек умирают в результате воздействия опасных химикатов. 2012. URL: <https://news.un.org/ru/story/2012/09/1208261>.
8. Шалфеева Е.А. Метод оценивания свойств многоуровневых онтологий. 2009. URL: <http://math.nsc.ru/conference/zont09/reports/16Shalfeeva.pdf>.
9. Онищенко Г.Г., Новиков С.М., Рахманин Ю.А., Авалиани С.Л., Буштуева К.А. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М., 2002. 408 с.
10. Пазынич В.М., Севальнев В.В., Таранов В.В. Мониторинг здоровья населения в связи с действием факторов окружающей среды в деятельности санитарно-эпидемиологической службы. Довкілля і здоров'я. 2002. № 3 (22). С. 7–9.
11. Артемьева И.Л., Рештаненко Н.В. Интеллектуальная система, основанная на многоуровневой онтологии химии. Программные продукты и системы. 2008. № 1. С. 84–87.
12. Артемьева И.Л. Многоуровневые математические модели предметных областей. Искусственный интеллект. 2006. № 4. С. 85–94.
13. Мельник К.В., Ершова С.И. Проблемы и основные подходы к решению задачи медицинской диагностики. Системи обробки інформації. 2011. Вип. 2 (92). С. 244–248.
14. Литвин В.В. Мультиагентні системи підтримки прийняття рішень, що базуються на прецедентах та використовують адаптивні онтології. Штучний інтелект. 2009. Вип. 2. С. 24–33.
15. Linkova Zdenka, Nedbal Radim, Rimnac Martin. Building Ontologies for GIS. Part 2. Technical report № 938. 2005. 14 p. (Institute of Computer Science. Academy of Sciences of the Czech Republic).
16. Коротенко Г.М., Шевченко К.В. Перспективы применения онтологических моделей для оценки значимости показателей и индикаторов, применяемых в социально-гигиеническом мониторинге. Cutting-edge science – 2015: materials of The XI International scientific and practical conference. (Sheffield, April 30 – May 7 2015). Vol. 25. On Ecology, Geography and Geology. Sheffield. 2015. С. 6–10.
17. Mansingh G., Osei-Bryson M.-K., Reichgelt H. Building ontology-based knowledge maps to assist knowledge process outsourcing decisions. Knowledge Management Research & Practice. 2008. Vol. 7. P. 37–51.
18. Madina J., Bowersb S., Schildhauera M., Penningtond D., Villac F. An ontology for describing and synthesizing ecological observation data. Ecological Informatics. 2007. Vol. 2. P. 279–296.
19. Mounce S.R., Brewster C., Ashley R.M., Hurley L. Knowledge Management for More Sustainable Water Systems. Journal of Information Technology in Construction. 2010. Vol. 15. P. 140–148.
20. Защита окружающей среды Европы. Четвертая оценка. Глава 2. Окружающая среда, здоровье и качество жизни. 2.5. Опасные химические вещества. Копенгаген: ЕАОС. 2007. URL: https://www.eea.europa.eu/ru/publications/state_of_environment_report_2007_1/chapter2.pdf/at_download/file.
21. Горшков С. Введение в онтологическое моделирование. М., 2016. 165 с.

ОНТОЛОГІЧНА КЛАСИФІКАЦІЯ ХІМІЧНИХ РЕЧОВИН ТЕХНОГЕННОГО ПОХОДЖЕННЯ У ЗАДАЧАХ СОЦІАЛЬНО-ГІГІЄНИЧНОГО МОНІТОРИНГУ

У статті досліджуються методики опису й аналізу забруднюючих речовин техногенного походження для створення спеціалізованої онтології, яка виступає в якості концептуальної моделі процесу класифікації хімічних речовин техногенного походження. Описуються структура предметної області, компонентний склад, рівні взаємодії і можливі зв'язки такої онтології.

Ключові слова: здоров'я населення, техногенний вплив, екологічні фактори, хімічні речовини, соціально-гігієнічний моніторинг, онтології.

**ONTOLOGICAL CLASSIFICATION CHEMICAL SUBSTANCES
OF TECHNOGENIC ORIGIN IN SOCIAL-HYGIENIC MONITORING TASKS**

In the article explores description and analysis methods of polluting substances of technogenic origin are for creating a specialized ontology that serves as a conceptual model for the classification process of technogenic origin chemical substances. The structure of the subject area, the components composition, the levels of interaction and possible connections of such an ontology are described.

Key words: *health of the population, technogenic influence, environmental factors, chemical substances, socio-hygienic monitoring, ontologies.*

Кравчук Є.С.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Сергєєв-Горчинський О.О

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АНАЛІЗ ВЗАЄМОДІЇ ЗМІСТУ НАВЧАЛЬНИХ ДИСЦИПЛІН ЗА ЇХ СЕМАНТИЧНИМ ОПИСОМ

Метою роботи є дослідження підходів до опису та побудови онтологій, зокрема, у домені навчальних дисциплін та методів автоматизації формування доменних знань із корпусу документів. Досліджено можливості застосування онтологій для представлення доменної області навчальних дисциплін і курсів. Описано поняття онтології в контексті комп'ютерних наук та семантичного вебу, розглянуто наявні онтології навчальних дисциплін, що використовуються у світі, та виявлено слабкі сторони ручного створення та підтримки онтологій. Проведено аналіз методів і підходів, що автоматизують процес побудови онтологій. Розглянуто обмеження, які постають під час вирішення таких задач як із теоретичної сторони, так і в контексті практичних аспектів побудови програмних додатків, що реалізують такі моделі. Досліджено сучасні інноваційні методи автоматичної побудови графа знань у межах доменної області.

Ключові слова: онтологія, навчальна дисципліна, граф знань, семантичний веб, семантичний пошук.

Постановка проблеми. У наш час із ростом кількості інформації дуже гостро постає проблема структуризації накопичених даних для отримання корисної інформації з них, зокрема у сфері навчання. Стрімкий ріст ринку масових онлайн-курсів та поява нових дисциплін і напрямів навчання робить таку проблему актуальною і в даній сфері.

Наявні засоби опису онтологій навчальних дисциплін і курсів вже не можуть повною мірою відповідати вимогам до швидкості створення, підтримки й обслуговування. Отже, тема набуває особливої актуальності в контексті опису навчальних дисциплін зокрема та представлення доменних знань загалом.

З огляду на стрімку автоматизацію навчальних процесів, з'являється потреба в зборі, агрегації та пов'язуванні навчальних дисциплін та матеріалів в одну систему. Розроблення методики, що охоплює ці процеси, дозволить створювати розподілені системи дистанційного навчання і використовувати різні навчальні матеріали.

Сьогодні для дистанційного навчання використовуються курси, які містять інформаційний документ із переліком основних понять та пред-

метів і посилань на літературу. Основною проблемою розвитку дистанційного навчання є «механічність» розроблення освітніх курсів, оскільки створення освітнього курсу зазвичай супроводжується переносом матеріалу лекції вручну в програмний додаток. У даний час проблемою є ефективний опис та організація наявного контенту для полегшення обміну, повторного використання та модифікації.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Семантичні мережі вирішують цю проблему. Семантична мережа – область досліджень штучного інтелекту, що має на меті створення метаданих. Основний виклик семантичного вебу – представити сутність контенту в зрозумілій для всіх користувачів формі.

«Онтологія» – термін, запозичений із філософії, який означає науку, що описує форми буття і те, як вони співвідносяться між собою. Інакше кажучи, онтологія – явний опис концептуалізації [1]. Веб-онтологія може включати опис класів, їхніх властивостей, а також індивідів класів. Онтології грають критично важливу роль в організації оброблення знань на базі веб, їх спільному використанні й обміні ними між додатками.

Онтології в загальному вигляді визначаються як спільно використовувані формальні концептуалізації конкретних предметних областей у вигляді тверджень, якими можуть обмінюватися люди і програмні додатки.

Компонентами онтології є:

- множина понять предметної області та їхніх атрибутів;
- множина відношень або асоціацій між виділеними поняттями;
- множина аксіом і правил виведення, заданих на виділених поняттях.

Консорціумом World Wide Web Consortium (далі – W3C) розроблені два основні стандарти для представлення онтологій, а саме: Resource Description Framework Schema (далі – RDFS) і мова Web Ontology Language (далі – OWL). RDFS і OWL є розширеннями моделі загального призначення Resource Description Framework (RDF) для представлення даних в Інтернеті.

RDF базується на XML, що дозволяє представляти твердження про ресурси у вигляді триплетів «суб'єкт – предикат – об'єкт», які визначають відношення між довільними суб'єктом і об'єктом за допомогою предиката (дієслова чи дієслівного звороту). Триплети придатні для машинного оброблення й інтелектуального аналізу даних (Data Mining) [2].

Мова OWL призначена для запису семантики предметних областей у вигляді онтологій. OWL стандартизує подання знань у веб, шляхом представлення дійсності в моделі даних «об'єкт – властивість» [2].

OWL придатна для опису не тільки веб-сторінок, але й будь-яких об'єктів дійсності. Кожному елементу опису в даній мові (зокрема, властивості, що зв'язує об'єкти) відповідає уніфікований ідентифікатор ресурсу (Uniform Resource Identifier, URI). OWL дозволяє описувати значення термінів у словниках і відношення між ними, наслідування класів, метахарактеристики, потужності зв'язків та еквівалентності.

Постановка завдання. Пошук та огляд наявних стандартів і специфікацій, присвячених формалізації процесів створення, зберігання й опису онтологій у домені навчальних дисциплін та пов'язаних із ними сферах, дозволили виокремити специфікації та стандарти онтологій, які широко використовуються у світі для опису доменних моделей навчальних курсів.

1. Learning Object Metadata Ontology (далі – LOM) – онтологія та словник, що застосовуються для представлення стандарту метаданих для

освітнього контенту IEEE LOM. Виконує функцію моста для зв'язування навчальних метаданих із Linked Open Data.

2. Academic Institution Internal Structure Ontology (далі – AIISO) – онтологія та словник, що надають класи та властивості для опису курсів, модулів, практичних і теоретичних навчальних матеріалів академічної установи [3].

3. Бібліографічна онтологія (Bibliographic Ontology (далі – BIBO)) описує бібліографічну інформацію в семантичній павутині у форматі RDF. Дана онтологія може використовуватися як антологія цитування, як онтологія класифікації документів чи як спосіб опису будь-якого документа у RDF. Ця специфікація служить документом простору імен «Бібліографічна онтологія». По суті, вона описує онтологію (класи та властивості) і терміни, з яких вона складається, щоб семантичні веб-додатки могли використовувати ці терміни в різних форматах, сумісних із RDF.

4. Linked Science Core Vocabulary Specification (далі – LSC) – науковий словник призначений для опису наукових ресурсів, серед яких елементи дослідження, їхній контекст та взаємозв'язок. LSC є зразком «будівельних блоків» для опису зв'язків між дисциплінами, зрозумілим для комп'ютера чином. LSC фокусується на властивостях, які можна використати для опису змісту дослідницької роботи, тобто для зіставлення досліджень, гіпотез, експериментів, даних та публікацій. LSC визначає тільки основні терміни для науки. Більш конкретні терміни, необхідні для різних наукових спільнот, можна записати як розширення LSC.

5. Learning Resource Metadata Initiative (далі – LRMI) – ініціатива, що має на меті зробити легшим пошук освітніх матеріалів через пошукові та спеціалізовані сервіси викладачів і учнів. Підходом, що лежить в основі LRMI, є розширення онтології schema.org таким чином, щоб можна було виражати важливі освітні характеристики та відношення [4].

6. Teaching Core Vocabulary Specification (далі – TEACH) – легкий словник основ викладання, який містить терміни, що дозволяють викладачам пов'язувати свої курси разом. Основний навчальний словник заснований на практичних вимогах, пред'явлених до проведення семінарів та опису курсів як зв'язаних даних [5].

7. Semantic units (далі – SemUnit) – проект, ініційований французькими вищими навчальними закладами. Мета проекту – акумулювати переваги семантичного веб та пов'язаних даних для покращення електронного навчання для широкого

кола французьких вищих навчальних закладів. У межах проекту розроблено онтологію OWL з урахуванням семантики елементів LOM [6].

Дослідження базових понять онтологій у контексті семантичного веб і відповідної термінології дозволяють зробити такий висновок: тема семантичного вебу та використання онтологій як основного апарату представлення доменних знань є інноваційною й актуальною, що активно розвивається та має право на впровадження у вітчизняну освіту.

Виклад основного матеріалу дослідження. В епоху аналітики великих даних, пошукові та рекомендаційні системи стали основними механізмами, за допомогою яких користувачі знаходять і виявляють корисну інформацію. Тому важливо, щоб ці системи оброблення даних могли надавати цільові, релевантні результати, які цілком відповідають намірам користувача.

Пошукові та рекомендаційні двигуни рідко можуть конкурувати, якщо вони не використовують моделі, що містять детальну інформацію про категорії заданих питань і, що більш важливо, категорії відповідей. Одним із найбільш типових шляхів представлення доменної області для наочної демонстрації цих ідей є використання онтологій – комбінацій таксономій, що містять попередньо відомі сутності, їхні властивості та взаємозв'язки. Такі онтології можна інтегрувати в пошуковий сервіс для того, щоб покращити його спроможність надавати кінцевому користувачу саме ті дані, які він очікує отримати. Наприклад, якщо хтось шукає термін «сервіс» у домені «комп'ютерних наук», то цей термін має дуже різні поняття, наприклад, в апаратному забезпеченні – «довічний сервіс» (lifelong service) чи протилежне значення в інформаційних технологіях – «веб-сервіс» (web service), коли хтось шукає вакансію, то запит може мати різноманітні значення залежно від контексту [7].

Онтології зазвичай будуються вручну експертами, що робить їх створення, підтримку й оновлення витратним рішенням. У науковому просторі розробляються підходи до пошуку зв'язків у доменних областях для часткової автоматизації процесу побудови онтологій.

Розглянемо методи й алгоритми, які використовують потужність великих аналітичних даних і розподілених обчислень для автоматичного створення мовно-незалежних семантичних баз знань. Такі семантичні бази знань дозволяють значно покращити узгодженість між запитом та документами, а отже, пропонувати більш релевантні результати для будь-якого пошукового або рекомендаційного запиту.

1. Пошукові двигуни є одним із найпоширеніших способів взаємодії людей із цифровою інформацією, вони можуть отримати більше користі від інтеграції із семантичними базами знань, які підвищують загальну спроможність пошукової системи точно інтерпретувати запити та відповідати на них. Можливість шукати будь-яку комбінацію ключових слів у трильйонах документів і оцінювати релевантність всіх результатів запиту за часом відповіді в кілька секунд потребує наявності вузькоспеціалізованих структур даних і підходів до їх моделювання, що працюють паралельно в розподіленій системі. Головним із них є інвертована індексація, відокремлення та реплікація даних, денормалізована модель даних, а також розподілена модель агрегації й оцінки.

2. Інвертований індекс – механізм швидкого пошуку за ключовими словами. Для створення інвертованого індексу потрібно спочатку створити прямий індекс, який зіставить документи та списки термінів, які містяться в них. В інвертованому індексі кожне ключове слово відповідає набору документів, які містять його. За інвертованим індексом можна швидко, без циклічного проходження за списком слів, визначити ті документи, які відповідають певному набору ключових слів у пошуковому запиті (див. рис. 1).

Єдине, що пропущено в спрощеному варіанті індексу, це те, що додаються ще і позиції терміну в документі, ці позиції (часто разом із метаданими) зберігаються разом з ідентифікатором документа. Фразові запити (наприклад, «дерев'яний бампер для телефону») можна знайти, використовуючи позиції в списку, щоб відфільтрувати документи, де всі терміни («дерево», «бампер», «телефон») з'являються послідовно.

3. Шардінг даних – корисна властивість інвертованого індексу, яка полягає в зростанні ймовірності використання термінів, вже наявних в індексі, у разі збільшення кількості індексованих документів. Це означає, що для великих наборів даних кількість термінів в індексі стабілізується за умови збільшення кількості документів, оскільки кількість термінів залежить від розподілу термінів у мові документа. Це дає можливість легко розділити інвертований індекс на декілька підіндексів і потім розподіляти запити до кожного з них паралельно й агрегувати отримані документи. Таке розбиття часто називається шардінгом (відокремленням) індексу.

4. Рекомендаційні системи – системи, що автоматизують процес виявлення інтересів користувача шляхом застосування технології інтелектуального

аналізу даних (Data Mining) для виявлення об'єктів, цікавих для окремих користувачів [8]. Протягом багатьох років архітектури рекомендаційних систем розвивалися як в академічному середовищі, так і в інформаційній індустрії (електронна комерція/електронний шопінг, електронні бібліотеки, електронне навчання, електронний туризм тощо) через експоненційне збільшення обсягу даних.

Рекомендаційні системи можна поділити на три основні категорії: контентні, зі спільною фільтрацією та гібридні технології [9]. Контентні є найбільш чутливими до розуміння текстового змісту, оскільки ці системи засновані на зіставленні елементів/користувачів на основі подібності між їхнім текстовим описом [10]. Наявність семантичної бази знань має вирішальне значення для підвищення ефективності контентних рекомендаційних систем [11].

5. Семантичне виявлення – процес побудови семантичних баз знань, що традиційно зосереджений на використанні онтологій/таксономій, які створюються та підтримуються їхнім розробником. Ручна побудова онтологій/таксономій не масштабується, важко підтримується і є дуже витратною роботою. Для виявлення семантичних

зв'язків між термінами даного корпусу використовують кластеризацію та зменшення розмірності, що супроводжується появою незрозумілих зв'язків. Окрім названих підходів для виявлення семантичних зв'язків між фразами можна спиратися на журнали пошуку користувачів.

Щоб краще зрозуміти проблему, подумаємо про різні значення слова «архітектор» у контексті «архітектури будівлі» та «архітектора програмного забезпечення». Якщо хтось вводить слово «архітектор» у формі пошуку, пошукова система на базі ключових слів поверне змішаний набір документів, серед яких деякі будуть стосуватися архітектури програмного забезпечення, проте інші – архітектури будівель. Типовий пошуковий двигун трансформує запит «архітектор будівель» у булевий вигляд «будівель» і «архітектор», в якому слова розглядаються як незалежні терміни, що призводить до вибору документів, в яких записано про когось, хто є «архітектором програмного забезпечення», який «будує додатки».

Маючи доступ до історії пошуку мільйонів користувачів, за допомогою аналізу великих даних можна виявити взаємозв'язки між пошуковими фразами та найпоширенішими значеннями кож-

Корпус текстів			Прямий індекс			Інвертований індекс		
Текст	Атрибут	Текст	Слово	Атрибут	Слово	Текст		
<p>Текст: 1 Посада: зареєстрована медсестра Опис: зареєстрована медсестра у лікарню Навички: онкологія, флеботомія</p> <p>Текст: 2 Посада: Інженер-програміст Опис: програмний інженер у компанію Навички: .net, java</p> <p>Текст: 3 Посада: Java-інженер Опис: інженер Java у компанію навички: Java, Swift</p>	Опис	1	зареєстро вана	Опис	зареєстро вана	1		
			медсестра		медсестра	1		
			у		у	1, 2, 3		
			лікарню		лікарню	1		
		2	програмни й		програмни й	2		
			інженер		інженер	2, 3		
			у		компанію	2, 3		
			компанію		Java	3		
		3	інженер		Посада зареєстро вана	1		
			Java		медсестра	1		
			у		інженер	2, 3		
			компанію		програміс т	2		
	Посада	1	зареєстро вана		Java	3		
			медсестра					
		2	інженер					
		програміст						
	3	Java						
		інженер						

Рис. 1. Зіставлення текстів у прямому й інвертованому індексах

ного терміна. Мірою схожості змісту двох термінів є семантична схожість [12]. Два основних підходи, використовувані для обчислення семантичної схожості, – семантичні мережі (підхід, заснований на знаннях), а також обчислення зв’язності термінів у великому корпусі текстів (структурний підхід) [13]. Основні методи – точкова взаємна інформація (Point-wise Mutual Information (далі – PMI)) та латентний аналіз семантики (Latent Semantic Analysis (далі – LSA)). Дослідження показують, що PMI перевершує LSA за знаходженням синонімів в Інтернеті [14].

Методи формування семантичних знань. Неоднозначний термін – термін, який відноситься до більш ніж одного значення, залежно від контексту. Наприклад, термін “java” може посилатися на мову програмування Java або на тип кави під назвою “java”, або на острів Індонезії Java.

Щоб виявити неоднозначні терміни, використовують метод побудови ймовірнісної моделі ієрархічних даних (Probabilistic Graphical Model for Massive Hierarchical Data Problems (далі – PGMHD)), який заснований на зборі пошукових термінів, введених користувачами для розрахунку оцінки смислової схожості термінів та класів користувачів. Метод розміщує класи користувачів у верхньому рівні, а пошукові терміни – у нижньому рівні семантичної моделі. Далі два рівні з’єднуються ребрами, які вказують на те, скільки користувачів із даного класу у верхньому рівні шукали певний термін у нижньому рівні. Якщо кількість з’єднань вище, ніж певне граничне значення для більш ніж одного базового класу, термін вважається неоднозначним.

Після виявлення неоднозначності термінів наступною задачею є вирішення цієї неоднозначності. Зменшення неоднозначності означає визначення ймовірних семантично пов’язаних значень неоднозначного терміна. Кожна група семантично пов’язаних термінів являє собою можливе значення первинного терміна з урахуванням контексту, в якому терміни були використані.

Наприклад, неоднозначний термін “driver” має семантично пов’язані терміни “transportation”, “truck driver”, “software”, “embedded system”, “CDL”. Класифікуючи ці терміни за допомогою класів користувачів, які згадували їх в журналах пошуку, у кінцевому підсумку їх можна розподілити на дві групи: 1) “transportation”, “truck driver”, “CDL” та 2) “software”, “embedded system”.

Оскільки PGMHD потрібен для виявлення неоднозначних термінів, ідентичну модель можна застосувати, щоб знайти для будь-якого заданого терміна семантично пов’язані терміни, що належать до одного класу. Для цього потрібно розрахувати оцінку подібності, засновану на ймовірнісних показниках, між даним терміном X та терміном Y [15].

Група семантично пов’язаних термінів, які класифікуються під тим самим батьківським класом, формує ймовірний зміст неоднозначного терміна. Даний підхід не має обмежень за кількістю синонімів: для деяких термінів є лише два можливих значення, деякі мають три і більше значень.

Окрім аналізу журналів запитів для автоматичного створення семантичних баз знань, також можна використовувати взаємозв’язки між словами і фразами, закодовані як в тексті, так і в



Рис. 2. Матеріалізація ребер із використанням документів

структурованому змісті множини документів. Шляхом оброблення вмісту даних, що представляють доменну область, можна автоматично згенерувати представлення області знань у вигляді графа.

Після того, як граф знань побудовано, треба пройти по всім вузлам, щоб отримати взаємозв'язки між ключовими словами, фразами, сутностями й іншими лінгвістичними варіаціями, представленими у вхідних даних. Ця модель називається «графом семантичних знань» (Semantic Knowledge Graph (далі – SKG)).

Інші системи побудови онтологій зазвичай намагаються визначити певні сутності в колекції і заповнити заздалегідь сформований граф взаємозв'язків між сутностями. Це, на жаль, призводить до значної втрати інформації тоді, коли значення терміна або фрази змінюється залежно від його лінгвістичного контексту. Одна із цілей підходу SKG полягає в тому, щоб цілком передбачити всі смислові взаємозв'язки, що містяться в наборі текстових документів.

Зміст слів може варіюватися залежно від контексту, в якому вони знайдені. Наприклад, слова «архітектор» та «інженер» добре відомі, але, коли вони трапляються всередині фраз, як-от «архітектор програмного забезпечення» або «інженер-електрик», вони мають більш обмежену інтерпретацію.

Модель SKG відрізняється від більшості традиційних графових структур, бо дозволяє неорієнтованість ребра, яке з'єднує будь-які два вузла. Щоб перейти від вихідного вузла v_i у вузол v_j по ребру e_{ij} , треба мати інвертований індекс пошуку, що встановлює відповідність вузла v_i до базового набору документів, а також прямий індекс пошуку, який ставить ці документи у відповідність до будь-якого іншого вузла v_j , з яким ці доку-

менти також пов'язані. Ця комбінація інвертованого і прямого індексів дозволяє відображати всі терміни або комбінації термінів як вузли в графі, виконувати обхід між будь-якими двома вузлами через набір спільно використовуваних документів, як показано на рис. 2.

Наявність ребер між документами зумовлена наявністю в них спільних термінів. Ваги ребер розраховуються за допомогою функції статистичного розподілу документів у вузлах. Граф семантичних знань забезпечує як без втрат, так і з високим ступенем стиснення, представлення всіх потенційних ребер, які пов'язують можливі матеріалізовані вузли.

Висновки. Розглянуто методи й інструменти формування семантичних знань, серед яких аналіз великих обсягів запитів за допомогою ймовірнісної моделі ієрархічних даних PGMHD, що дозволяє знайти семантично пов'язані терміни та фрази, які можна застосувати для побудови онтологій. Також описано метод виявлення та зменшення неоднозначності змісту термінів і фраз, які знаходяться в журналах запитів.

Розглянуто модель Semantic Knowledge Graph, яка застосовує співвідношення між словами та фразами в межах документів, щоб автоматично генерувати граф співвідношень між фразами. Із графа знань можна виявити й оцінити зв'язки між будь-якими суб'єктами, що містяться в ньому, суто за змістом індексованих документів.

Застосування семантичних методів є необхідною умовою для побудови пошукових і рекомендаційних систем, здатних індексувати документи, формувати семантичні зв'язки та гнучко інтерпретувати вхідні запити. Прикладом вдалої інтеграції графа знань є підвищення на 59–76% релевантності результатів пошуку в одній із найбільших у світі систем для пошуку вакансій [16].

Список літератури:

1. Грибова В., Клещев А. Онтологическая парадигма программирования. Open Semantic Technologies for Intelligent Systems, 2012. С. 213–220. URL: http://conf.ostis.net/images/a/ab/%D0%93%D1%80%D0%B8%D0%B1%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%92.%D0%92..2012%D1%81%D1%82-%D0%9E%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%BB%D0%9F%D0%9F.pdf (дата звернення: 15.04.2018).
2. Resource Description Framework, Web Ontology Language. URL: [https://www.w3.org/\(/RDF чи OWL/\)](https://www.w3.org/(/RDF%20чи%20OWL/)) (дата звернення: 12.02.2018).
3. Academic Institution Internal Structure Ontology (AIISO). URL: <http://vocab.org/aiiso/schema#> (дата звернення: 21.02.2018).
4. Learning Resource Metadata Initiative (LRMI). URL: <https://wiki.creativecommons.org/wiki/LRMI> (дата звернення: 23.02.2018).
5. Teaching Core Vocabulary Specification. URL: <http://linkedscience.org/teach/ns/#sec-reference> (дата звернення: 26.02.2018).
6. Ontologies informatiques at SemUnit. URL: http://semunt.supelec.fr/pubby/page/ressource/unit/_2166_Ontologies_informatiques (дата звернення: 27.02.2018).

7. Navigli R., Velardi P. Learning domain ontologies from document warehouses and dedicated web sites. *Computational Linguistics*. 2004. Т. 30. №. 2. P. 151–179.
8. Bobadilla J., Ortega F., Hernando A., Gutierrez A., Recommender systems survey. *Knowledge-based systems*. 2013. Vol. 46. P. 109–132.
9. Aggarwal C. Content-based recommender systems. *Recommender Systems*. Springer; Cham, 2016. P. 139–166.
10. Pazzani M., Billsus D. Content-based recommendation systems. *The adaptive web*. Springer; Berlin; Heidelberg, 2007. P. 325–341.
11. Semantics-aware content based recommender systems / M. de Gemmis, P. Lops, C. Musto, F. Narducci, G. Semeraro. *Recommender Systems Handbook*. Springer; Boston; MA, 2015. P. 119–159.
12. Semantic measures for the comparison of units of language, concepts or instances from text and knowledge base analysis / S. Harispe, S. Ranwez, S. Janaqi, J. Montmain. *arXiv preprint arXiv: 1310.1285*. 2013.
13. Mihalcea R., Corley C., Strapparava C. Corpus-based and knowledge-based measures of text semantic similarity. *AAAI*. 2006. Vol. 6. P. 775–780.
14. Turney P. Mining the web for synonyms: PMI-IR versus LSA on TOEFL. *Proceedings of the 12th European Conference on Machine Learning, EMCL 01, (London, UK)*. Springer-Verlag, 2001. P. 491–502.
15. PGMHD: A scalable probabilistic graphical model for massive hierarchical data problems / K. AlJadda, M. Korayem, C. Ortiz, T. Grainger, J. Miller, and W. York. *Big Data (Big Data)*, 2014. IEEE International Conference on, IEEE, 2014. P. 55–60.
16. Grainger T., AlJadda K., Korayem M., Smith A. The Semantic Knowledge Graph: A compact, auto-generated model for real-time traversal and ranking of any relationship within a domain. *Data Science and Advanced Analytics (DSAA)*, 2016. IEEE International Conference on. IEEE, 2016. С. 420–429.

АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОДЕРЖАНИЯ УЧЕБНЫХ ДИСЦИПЛИН ПО ИХ СЕМАНТИЧЕСКОМУ ОПИСАНИЮ

Целью данной работы является исследование существующих подходов к описанию и построению онтологий, в частности, в домене учебных дисциплин, и методов автоматизации формирования доменных знаний из корпуса документов. Исследованы возможности применения онтологий для представления доменной области учебных дисциплин и курсов. Описаны понятия онтологии в контексте компьютерных наук и семантического веба, рассмотрены существующие онтологии учебных дисциплин, используемых в мире, и выявлены слабые стороны ручного создания и поддержания онтологий. Проведен анализ методов и подходов, автоматизирующих процесс построения онтологий. Рассмотрены ограничения, возникающие при решении подобных задач как с теоретической стороны, так и в контексте практических аспектов построения приложений, реализующих такие модели. Исследованы современные инновационные методы автоматического построения графа знаний в рамках доменной области.

Ключевые слова: онтология, учебная дисциплина, граф знаний, семантический веб, семантический поиск.

ANALYSIS OF THE INTERACTION OF THE EDUCATIONAL DISCIPLINES CONTENT BY THEIR SEMANTIC DESCRIPTION

The purpose of this work is to study existing approaches to the description and construction of ontologies, especially in the domain of academic disciplines and methods for automating the presentation of domain knowledge from the body of documents. Possibilities of application of ontologies for representation of the domain area of educational disciplines and courses are studied. The concept of ontology in the context of computer science and semantic web is described, various existing ontologies of educational disciplines used in the world are considered and the weaknesses of manual creation and support of ontology are revealed. The analysis of methods and approaches that automate the process of construction of ontologies is carried out. The limitations, which arise when solving similar problems from the theoretical side and in the context of practical aspects of constructing software applications implementing such models are considered. Innovative modern methods of automatic building of a knowledge graph within the domain area are investigated.

Key words: ontology, educational discipline, knowledge graph, semantic web, semantic search.

Левкин Д.А.Харьковский национальный технический университет
сельского хозяйства имени Петра Василенко**АДЕКВАТНОСТЬ РАСЧЕТНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭМБРИОН**

В статье доказана адекватность расчетной математической модели, описывающей процесс действия лазерного луча на эмбрион. Для этого автором определены условия корректности краевой задачи системы дифференциальных уравнений теплопроводности, лежащей в основе расчетной математической модели. Отметим, что из-за сложной формы и трехслойной внутренней структуры эмбриона невозможно гарантировать наличие и единственность решения краевой задачи. Для оптимизации параметров теплового поля необходима корректная постановка краевой задачи процесса действия лазерного луча на эмбрион. Выполнение этого требования позволит повысить точность и быстродействие реализации прикладных оптимизационных математических моделей процесса лазерного воздействия на эмбрион, а также снизить энергозатраты и повысить выживаемость клеток при трансплантации.

Ключевые слова: адекватность, расчетная математическая модель, эмбрион, корректность, оптимизация.

Постановка проблемы. При расчете технических параметров процесса воздействия физических полей на многослойные биоматериалы актуальным является вопрос обеспечения биотехнологического процесса воздействия с минимальными потерями дорогостоящего биоматериала. На практике часто возникают задачи, когда необходимо провести оптимизацию технических параметров процесса воздействия на многослойные, нелинейные, неоднородные микробиологические материалы сложной пространственной формы. В качестве примера многослойного микробиологического материала рассмотрим эмбрион под воздействием сканируемых источников лазерного облучения. Сложная пространственная форма микробиологического объекта и его трехслойная, нелинейная, неоднородная внутренняя структура приводит к тому, что для оптимизации параметров целевой функции (теплового поля) эмбриона необходим многократный перебор ее значений. Это возможно благодаря многократной реализации расчетной математической модели процесса лазерного воздействия на эмбрион. Некоторые вопросы оптимизации многослойных биологических систем затронуты в работах автора [1; 2].

Как показано в работе [3], в основе расчетной математической модели процесса действия лазерного луча на эмбрион лежит краевая задача пяти

дифференциальных уравнений теплопроводности в сферической системе координат:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} - \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r_1} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + q_1 = 0 \quad \text{при } r \in [0; r_1], t \in [0; t_1]; \\ \rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} - \lambda_2 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r_2} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + q_2 = 0 \quad \text{при } r \in [r_1; r_2], t \in [t_1; t_2]; \\ \rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} - \lambda_3 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{2}{r_3} \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + q_3 = 0 \quad \text{при } r \in [r_2; r_3], t \in [t_2; t_3]; \\ \rho_4 c_4 \frac{\partial T_4}{\partial t} - \lambda_4 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{2}{r_4} \frac{\partial T_4}{\partial r} \right) + q_4 = 0 \quad \text{при } r \in [r_3; r_4], t \in [t_3; t_4]; \\ \rho_5 c_5 \frac{\partial T_5}{\partial t} - \lambda_5 \left(\frac{\partial^2 T_5}{\partial r^2} + \frac{2}{r_5} \frac{\partial T_5}{\partial r} \right) + q_5 = 0 \quad \text{при } r \in [r_4; r_5], t \in [t_4; t_5], \end{array} \right. \quad (1)$$

где ρ_e – коэффициент плотности e -го слоя эмбриона; c_e – коэффициент теплоемкости; $T_e = T_e(r, t)$ – температурное поле эмбриона; r – пространственная переменная; t – длительность действия лазерного луча; r_e – расстояние от центра источника теплового воздействия в виде пятна до точки в e -м слое эмбриона, в которой определяется значение температурного поля; λ_e – коэффициент теплопроводности e -го слоя; q_e – удельная плотность мощности тепловых нагрузок в эмбрионе.

Для учета начала и конца действия лазерного луча на эмбрион введены граничные условия Дирихле:

$$\left\{ \begin{array}{l} T(r_0, t_0) = T_n; \\ T(r_5, t_5) = T_k, \end{array} \right. \quad (2)$$

где T_n – температура эмбриона в начале действия лазерного луча; T_k – температура эмбриона в конце действия лазерного луча.

Граничное условие теплового обмена в зоне пеллюцида и окружающей среде имеет вид:

$$-\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r}(0, t) = qS, \quad 0 \leq t \leq h, \quad (3)$$

где q – удельный тепловой поток; S – диаметр источника теплового воздействия, т. е. пятна; h – длительность действия источника.

Расчетная математическая модель приведена без числовых значений плотности, коэффициентов теплоемкости и теплопроводности, а также других технических параметров, характерных для биотехнологического процесса лазерного воздействия на эмбрион. Значения вышеуказанных параметров стоит учитывать при реализации математической модели после того, как будет доказано наличие и единственность решения краевой задачи, лежащей в ее основе.

Заметим, что в силу сложной пространственной формы и трехслойной структуры эмбриона невозможно гарантировать корректность данной краевой задачи. Для осуществления оптимизации технических параметров лазера, экономии тепловых и энергоресурсов, а также контроля послыонного распределения температурных полей в эмбрионе необходимо проверить наличие и единственность решения рассмотренной краевой задачи.

Анализ последних исследований и публикаций. Актуальность вопроса исследования отражена в работах ведущих зарубежных и отечественных ученых [4–9]. Несмотря на то, что в работах [4–7] исследованы вопросы оптимизации не биологических, а электротехнических, экологических и других систем, важным в них является подход к расчету и оптимизации параметров целевой функции. Результаты работ [8; 9] посвящены расчету и оптимизации конкретных технических параметров процесса действия лазерного луча на эмбрион. Однако в работах [8; 9] не учитывается трехслойная структура эмбриона, и микробиологический объект принимается как однородное сферическое тело. Это приводит к получению усредненной температуры лазерного воздействия на эмбрион, погрешностям оптимизируемых технических параметров процесса воздействия, а значит, к излишним потерям клеток.

Постановка задания. Целью работы является обоснование адекватности расчетной математической модели процесса действия лазерного луча на эмбрион.

Изложение основного материала исследования. Проверим корректность (существование и единственность решения) краевой задачи для системы пяти дифференциальных уравнений

теплопроводности в сферической системе координат. Для этого воспользуемся результатами работы [10].

Перепишем дифференциальное уравнение теплопроводности из системы (1) в следующем виде:

$$P_0(r, D_r, D_r)T(r, t) + aP_1(r, D_r, D_r)T(r, t) = f(r, t), \quad (4)$$

$$\text{где } a = -\frac{\lambda}{\rho c}.$$

Покажем, что краевая задача для возмущенного дифференциального уравнения (4) будет корректна в пространстве $S[a, b]$, т. е. в пространстве бесконечно дифференцируемых функций на сегменте $[a, b]$ вместе со всеми производными, равными нулю в точке a .

Для этого, согласно результатам работ [10–12], рассмотрим символ возмущенного дифференциального уравнения (4):

$$P(r, \tau, \eta) = i\tau + a\eta^2 - \frac{2ai\eta}{r}. \quad (5)$$

Представим символ (5) в виде суммы:

$$P(r, \tau, \eta) = P_0(r, \tau, \eta) + P_1(r, \tau, \eta), \quad (6)$$

где $P_0(r, \tau, \eta) = i\tau + a\eta^2$;

$$P_1(r, \tau, \eta) = -\frac{2ai\eta}{r}.$$

Проверим, будет ли $P_0(r, \tau, \eta)$ экспоненциально-корректным полиномом постоянной силы, а $P_1(r, \tau, \eta)$ – подчиненным символом дифференциального оператора. Для этого воспользуемся определением экспоненциально-корректного полинома и условием постоянства силы, рассмотренными в работах [10; 12].

Полином $P(\tau, \eta)$ называется экспоненциально-корректным, если для любого $v > 0$ найдется $p(v)$: $P(\tau, \eta + i\omega) \neq 0$, $\text{Im } \tau < p(v)$, $|\omega_j| < v$ при $j = 1, \dots, n - 1$.

Символ $P(x, \tau, \eta) = \sum a_j(x)\tau^{j_0}\eta^{j_1} \dots \eta^{j_{n-1}}$ удовлетворяет условию постоянства силы, если найдутся $A > 0, \gamma_0$: $|P(x', \tau, \eta) / P(x'', \tau, \eta)| < A$ для любых $x', x'' \in R^n$, $\text{Im } \tau < \gamma_0$.

Так, в символе оператора $P_0(r, \tau, \eta) = i\tau + a\eta^2$, $\tau_1 = \text{Im } \tau = a((\text{Re } \tau)^2 - \omega^2)$ и при $\text{Im } \tau < 0$ полином $P_0(r, \tau, \eta)$ является экспоненциально-корректным.

Заметим, что полином $P_0(r, \tau, \eta)$ не зависит от r , а значит автоматически выполнено условие постоянства силы.

Дифференциальный оператор

$$P_1(r, D)T = -\frac{2a}{r} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r}$$

является подчиненным оператору

АДЕКВАТНІСТЬ РОЗРАХУНКОВОЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСА ЛАЗЕРНОЇ ДІЇ НА ЕМБРІОН

У статті доведена адекватність розрахункової математичної моделі, що описує процес дії лазерного променя на ембріон. Для цього автором визначені умови коректності крайової задачі системи диференціальних рівнянь теплопровідності, що лежить в основі розрахункової математичної моделі. Зазначимо, що через складну форму та тришарову внутрішню структуру ембріона неможливо гарантувати наявність та єдиність розв'язку крайової задачі. Для здійснення оптимізації параметрів теплового поля необхідна коректна постановка крайової задачі процесу дії лазерного променя на ембріон. Виконання цієї умови дозволить підвищити точність та швидкість реалізації прикладних оптимізаційних математичних моделей процесу лазерної дії на ембріон, а також зменшити енерговитрати та підвищити виживання клітин під час трансплантації.

Ключові слова: адекватність, розрахункова математична модель, ембріон, коректність, оптимізація.

THE ADEQUACY OF CALCULATED MATHEMATICAL MODEL OF AN ACTION PROCESS OF A LASER BEAM ON AN EMBRYO

In the article we prove the adequacy of calculated mathematical model which describes an action process of a laser beam on an embryo. For this purpose conditions of correctness of boundary-value problem of a system of differential equations of thermal conductivity which is fundamental for calculated mathematical model were determined by the author. It should be noticed that it is impossible to assure existence and uniqueness of a solution of boundary-value problem because of sophisticated form and three-layer internal structure of an embryo. In this connection, correct setting of boundary-value problem of an action process of a laser beam on an embryo is needed for implementation of optimization of parameters of thermic field. Implementation of this requirement will allow increasing exactness and operating speed of realization of applied optimized mathematical models of an action process of a laser beam on an embryo, decreasing energy consumption and increasing survival of cells during transplantation.

Key words: adequacy, calculated mathematical model, embryo, correctness, optimization.

Ніколов М.О.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Макаренко А.В.

Київська міська клінічна лікарня № 14

Мартиш Є.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

АНАЛІЗ ПРОСТОРОВОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ПАРЕНХИМИ ПЕЧІНКИ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ РЕТИКУЛОСЦИНТИГРАФІЇ

Метою роботи є розроблення алгоритму інтегральної оцінки просторового розподілу (неоднорідності) радіофармпрепарату в печінці під час проведення ретикулосцинтиграфії. Розроблений метод може бути корисним у моніторингових дослідженнях функціонального стану печінки. Під час апробації методу на основі аналізу сцинтифотопечінки у 28 хворих результати розрахунків порівнювалися з якісною експертною оцінкою та параметром ентропії. Показано, що запропонований кількісний критерій неоднорідності статистично достовірно корелює з параметром ентропії, однак є більш коректним за зміни геометричної форми печінки в разі крупновогнещевої патології.

Ключові слова: ретикулосцинтиграфія, печінка, неоднорідність, ентропія, аналіз зображень.

Постановка проблеми. Одним із методів діагностики функціонального стану печінки є сцинтиграфічне дослідження (далі – СЦ) ретикуло-ендотеліальної системи (далі – РЕС). Сцинтиграфію РЕМ проводять для оцінки стану печінки і селезінки для визначення їхніх форми, розмірів і порушень анатомо-морфологічної структури в разі наявності пухлин, цирозу, гепатитів та інших захворювань [1–3]. У такому дослідженні печінку візуалізують із використанням колоїдних частинок, зазвичай мічених ^{99m}Tc . Колоїдні частинки фагоцитуються клітинами Купфера, де і залишаються протягом досить тривалого часу, що дозволяє оцінити їх просторовий розподіл за даними статичних досліджень (зображення печінки в заданій проекції) та зробити однофотонну емісійну комп'ютерну томографію [4].

У разі наявності захворювань печінки накопичення і просторовий розподіл радіофармпрепарату (далі – РФП) у печінці змінюється. Клітини РЕС, що функціонують, та відповідні області на сцинтифотопечінки не візуалізуються, наприклад, пухлини, кісти, і проявляються як дефекти накопичення.

У клінічній практиці просторового розподілу РФП у печінці оцінюється за такими критеріями [3; 5]:

- характер розподілу РФП: рівномірний, дифузний або нерівномірний, вогнищевий (наявні ділянки зі зниженим накопиченням препарату);
- характер вогнищевих змін: їхня кількість (окремі або множинні); локалізація; величина (великовогнищеві, мілковогнищеві).

Однак під час моніторингових досліджень за необхідності кількісного порівняння просторової неоднорідності розподілу РФП у печінці на різних етапах лікування такі критерії малоінформативні і не відображають динаміки процесу. Водночас дані щодо цієї проблеми майже відсутні в літературі, хоча варто зазначити деякі експериментальні дослідження, наприклад [6], та теоретичні положення [7].

Постановка завдання. Метою роботи є розроблення алгоритму інтегральної оцінки просторового розподілу (неоднорідності) РФП у печінці під час проведення сцинтиграфічних досліджень РЕМ.

Виклад основного матеріалу дослідження. Алгоритм оцінки ПН розподілу РФП у печінці.

У роботі для визначення поняття ПН поля будемо дотримуватися такої характеристики неоднорідності текстури зображення [8]: просторова неоднорідність характеризується кількістю областей у зоні інтересу (далі – ЗІ) вищезаданого рівня, їхніми геометричними розмірами й амплітудою. Області з відносно рівномірним розподілом або області незв’язності (для сегментованого зображення) будемо називати «патернами».

Виходячи з введеного визначення ПН, під час розгляду плоскої задачі можна записати:

$$\Psi_{(1)} \sim NGS,$$

де Ψ – параметр неоднорідності, N – кількість патернів, G – ефективний градієнт між патерном і деяким «нульовим» рівнем, S – площа патернів.

Можна помітити, що геометричні розміри патернів можуть бути абсолютно різними, а їхній розмір визначає масштаб неоднорідності: мікро- і макронеоднорідність. Очевидно, що за складного розподілу поля в просторі неоднорідність варто розглядати як спектр від площ патернів. Інакше кажучи, той самий розподіл поля може утворювати як мікро-, так і макронеоднорідності.

Різні за геометричними розмірами неоднорідності (дефекти накопичення ФРП) мають відповідну діагностичну значущість: чим більше сумарна площа дефектів, тим гірший прогноз, тим більше ураження печінки. Тому, на відміну від [8], для врахування значущості сумарної площі ураження доцільно використовувати вагову функцію, зокрема:

$$\Psi_{(2)}(S) \sim N(S)G \left[- \left(\frac{S_{\Sigma S}}{S_0} \right)^2 + 2 \left(\frac{S_{\Sigma S}}{S_0} \right) \right], \quad (4.3)$$

S_0 – площа ЗІ печінки, $S_{\Sigma S}$ – сумарна площа патернів, що мають площу приблизно $S \pm \Delta S$, $\Psi(S)$ – параметр неоднорідності масштабу S .

Отже, якщо зображення, що аналізується, характеризується одним патерном, то максимальна ПН буде спостерігатися за $S = S_0$.

Під час розгляду методів оброблення зображень кількість патернів можна оцінити за допомогою їх бінаризації, переведенням у двокольорове зображення за заданим рівнем (L) і обчисленням областей незв’язності. Градієнт (G) між патернами можна оцінити як:

$$G = \Delta U = U - L, \quad (4.4)$$

де U – середня амплітуда патернів.

Дефекти накопичення препарату можуть мати різну амплітуду, тому рівень бінаризації L теж має бути змінним.

Узагальнений алгоритм оцінки ПН розподілу ФРП зводиться до таких кроків:

1. Нормування зображення печінки (A) й інвертування зображення (оскільки аналізуються ділянки зниженого накопичення РФП):

$$A_n = \frac{A - \min(A)}{\max(A) - \min(A)}, \quad A_0 = 1 - A_n.$$

Необхідність в інвертуванні зображення пов’язана з тим, що неоднорідність здебільшого представлена дефектами накопичення РФП.

2. Завдання рівнів дискретизації ΔL та ΔS .

$$L \in (0 \dots 1), \quad S \in (0 \dots S_0),$$

де ΔL – крок рівня бінаризації зображення, ΔS – мінімальна площа патернів, S_0 – площа зображення печінки. $L \gg \min(\Delta A)$, де ΔA – мінімальний перепад СРС між двома сусідніми пікселями на всьому просторі ЗІ печінки. $\Delta S \rightarrow \min$, $\Delta S \gg s$, s – площа пікселя зображення.

3. Бінаризація зображення за рівнем:

$$L_{i+1} = L_i + \Delta L, \quad i = 1, 2, \dots, N_L.$$

4. Підрахунок кількості патернів $N_p(S_j)$ і сумарної площі $S_{\Sigma S_j}$ для кожного діапазону

$$S_j + \Delta S \quad (j = 1, 2, \dots, \frac{S_0}{\Delta S} = n).$$

5. Розрахунок середньої амплітуди патернів $\Delta U(S_j)$ площею $S_j + \Delta S$.

6. Розрахунок параметра неоднорідності:

$$\Psi(S_j) = \frac{1}{N_L} \sum_{i=L}^{L+\Delta L} N_L(S_j) (N_{L\Sigma} - 0,5)^2 \Delta U_{\Sigma}(S_j) \left[- \left(\frac{S_{\Sigma S_j}}{S_0} \right)^2 + 2 \left(\frac{S_{\Sigma S_j}}{S_0} \right) \right],$$

де $N_{L\Sigma}$ – загальна кількість патернів за заданого рівня бінаризації L .

Наявність поправочного коефіцієнта $(N_{L\Sigma} - 0,5)^2$ пов’язана з тим, що множинні дефекти повинні мати більшу значущість, ніж поодинокі патерни.

Результат розрахунку $\Psi(S_j)$ – дискретно-безперервний спектр від площі патернів S_j . Для характеристики неоднорідності розподілу РФП одним числовим значенням було запропоновано розраховувати інтегральний параметр неоднорідності:

$$\Psi_f = \Delta S \sum_{i=1}^n \Psi(S_i). \quad (1)$$

Клінічні дослідження. Для клінічної апробації запропонованого способу оцінки ПН розподілу РФП у печінці проаналізовано 28 зображень із РФП 99mTc-колоїд (99mTc-технефіт) пацієнтів із різною патологією РСС і різного ступеня ураження паренхіми. Як критерій порівняння ПН із (1) була застосована міра ентропії (E) за Шенноном зображення печінки A_0 .

Результати аналізу представлені на рис. 1. Дані показують досить високу кореляційну залежність між двома критеріями неоднорідності (коефіцієнт кореляції, без урахування результатів двох пацієнтів, зазначених стрілками на рис. 1, становить 0,86). Для аналізу причин різкого відхилення

деяких значень від лінії регресії зображення експертним шляхом були ранжовані за ступенем неоднорідності. Після зіставлення кількісних даних та експертної оцінки встановлено, що відхилення пов'язані із грубими великовогнищевими змінами печінки зі зміною її форми (рис. 2 е).

Наведені зображення (рис. 2) і їх аналіз показують, коли форма печінки різко не змінена, то обидва критерії ПН мають однакову значущість. Коли є грубі порушення функціонального стану паренхіми печінки, то параметр Ψ_f дає більш адекватні резуль-

тати розрахунку. Крім того, нормування яскравості зображення печінки проводилось на максимальне значення радіоактивності в ЗІ. Це було пов'язано з необхідністю коректного порівняння розрахунків ПН із параметром ентропії. Однак у разі значного пошкодження паренхіми в печінці її функцію частково компенсує селезінка (рис. 2 г, д). У такому разі доцільно проводити нормування на максимальну радіоактивність селезінки. Кількісно це підвищує чутливість ПН Ψ_f до патологічних змін. Так, для зображень на рис. 2 г та д під час нормування на максимальну радіоактивність селезінки Ψ_f підвищився всередньому в 1,3 рази, що з погляду експертної оцінки є більш адекватним результатом.

Висновки:

1. Розроблено новий критерій просторової неоднорідності розподілу РФП у печінці за даними ретикулоцинтиграфії.

2. У разі помірних змін форми печінки ентропія розподілу РФП у печінці і розроблений критерій неоднорідності мають однакову значущість. У разі грубих змін функціонального стану паренхіми печінки інтегральний параметр неоднорідності дає більш адекватні результати, ніж ентропія.

3. Розроблений критерій ПН розподілу РФП у печінці може бути використаний у моніторингових дослідженнях пацієнтів.

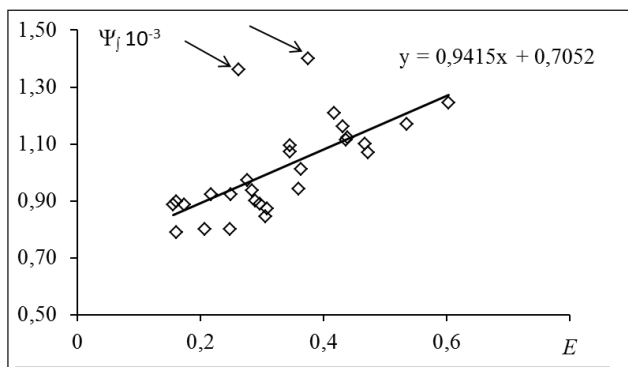


Рис. 1. Взаємна зміна ентропії й інтегрального параметра ПН зображень печінки за даними ретикулоцинтиграфії

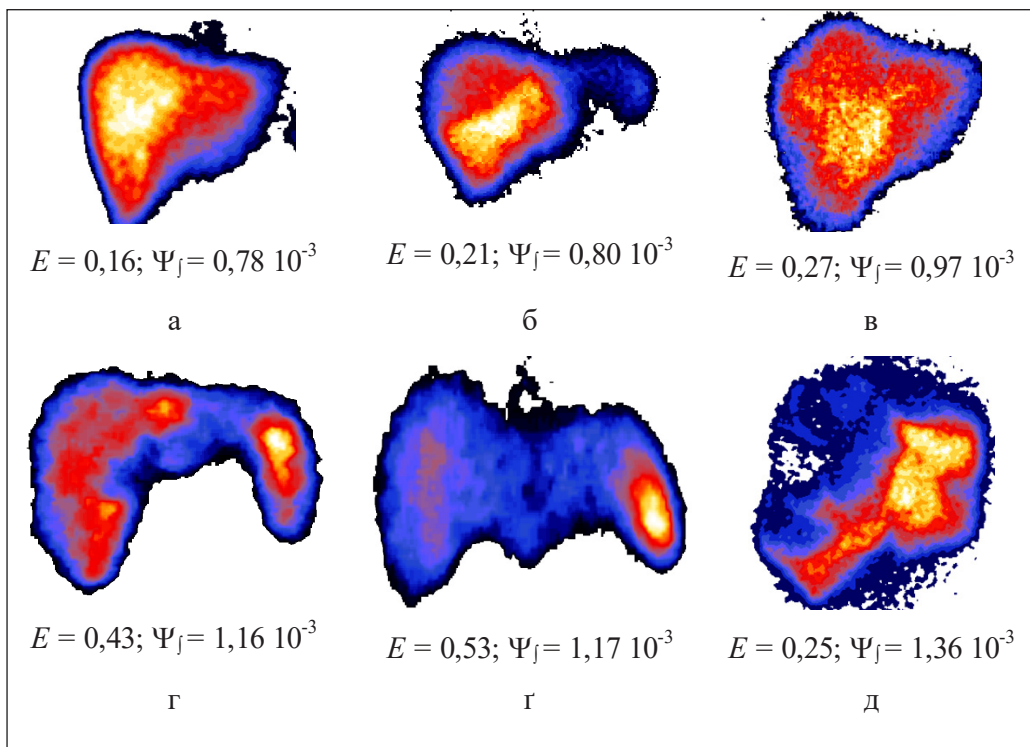


Рис. 2. Порівняння експертної та кількісної оцінки ПН розподілу РФП у печінці: а – умовно нормальний розподіл; б, в – дифузно-неоднорідний + вогнищевий розподіл; г, г, д – крупновогнищевий розподіл, д – крупновогнищевий розподіл зі зміною форми печінки

Список літератури:

1. Радионуклідная диагностика для практических врачей / под ред. Ю. Лишманова, В. Чернова. Томск: STT, 2004. 394 с.
2. Губкин С., Борейко С., Тихомирова Т. и др. Сцинтиграфия в ревматологической практике: монография. Мн.: УП «Технопринт», 2004. С. 58.
3. Мечев Д., Щербіна О., Мечев А. Статична сцинтиграфія печінки (гепатосцинтиграфія). Радіологічний вісник. 2014. Т. 52. № 3. С. 27–30.
4. Bowen S., Chapman T., Borgman J. et al. Measuring total liver function on sulfur colloid SPECT / CT forim proved risk stratification and out come prediction of hepatocellular carcinoma patients. EJNMMI Research. 2016. P. 10. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4923007/pdf/13550_2016_Article_212.pdf (дата звернення: 28.05.2018).
5. Chakraborty D., Sunil H., Mittal B. et al. Role of Tc99m sulfur colloid scintigraphy in differentiating non-cirrhotic portal fibrosis from cirrhosis liver. Indian J Nucl Med. 2010. V. 25. № 4. P. 139–142.
6. Rajkumar V., Goh V., Siddique M. et al. Texture analysis of 125I-A5B7 anti-CEA antibody SPECT differentiates metastatic colorectal cancer model phenotypes and anti-vascular therapy response. Br J Cancer. 2015. V. 112. № 12. P. 1882–1887.
7. Feng D. Biomedical Information Technology. Academic Press, 2007. 552 p.
8. Николов Н. Количественный критерий пространственной неоднородности электромагнитного поля в ближней зоне рамочного излучателя. Кибернетика и системный анализ. 2013. № 2. С. 170–177.

АНАЛИЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПАРЕНХИМЫ ПЕЧЕНИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕТИКУЛОСЦИНТИГРАФИИ

Целью работы является разработка алгоритма интегральной оценки пространственного распределения (неоднородности) радиофармпрепаратов в печени при проведении ретикулосцинтиграфии. Разработанный метод может быть полезен при мониторинговых исследованиях функционального состояния печени. При проведении апробации метода на основе анализа сцинтифото печени у 28 больных результаты расчетов сравнивались с качественной экспертной оценкой и параметром энтропии. Показано, что предложенный количественный критерий неоднородности статистически достоверно коррелирует с параметром энтропии, однако является более корректным при изменении геометрической формы печени при крупноочаговой патологии.

Ключевые слова: ретикулосцинтиграфия, печень, неоднородность, энтропия, анализ изображений.

ANALYSIS OF SPATIAL INHOMOGENEITIES OF THE LIVER PARENCHYMIS IN DURING RETICULUM SCINTIGRAPHY

The aim of the article is the development of an algorithm for the integrated evaluation of the spatial distribution (heterogeneity) of radiopharmaceuticals in the liver on data reticuloscintigraphy. The developed method can be useful in monitoring studies of the functional state of the liver. When the method was tested on the basis of analysis in 28 patients, the results of the calculations were compared with a qualitative expert evaluation and the entropy parameter. It is shown that the proposed quantitative criterion of inhomogeneity is statistically significant correlated with the entropy parameter, however new criterion is more correct when the geometric shape of the liver changes in large-focal pathology.

Key words: reticuloscintigraphy, liver, heterogeneity, entropy, image analysis.

Погромська Г.С.

Миколаївський національний університет імені В.О. Сухомлинського

Христордов О.В.

Миколаївський національний університет імені В.О. Сухомлинського

ШИФРУВАННЯ ДАНИХ ЯК СКЛАДНИК СТВОРЕННЯ ВІЛЬНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ГАЛУЗІ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ

У статті надані особливості реалізації алгоритму криптографічного методу шифрування / дешифрування даних RSA й описані характеристики та технологія криптографічного протоколу SSL. Розроблена захищена процедура автентифікації користувачів засобами мови Qt для модернізації програмного продукту “StudBD” v 1.0 із відкритим кодом для обліку відомостей про студентів вищого навчального закладу та їхню успішність із навчальних дисциплін на посилення криптографічного складника. Надано опис логіки шифрування даних, опрацьовуваних програмним продуктом.

Ключові слова: база даних, вільне програмне забезпечення, шифрування даних, Qt, C++, RSA, SSL.

Постановка проблеми. Оброблення та зберігання інформації – це невід’ємний складник функціонування будь-якого підприємства, організації, університети не є винятком. Метою захисту даних, що зберігаються в інформаційній системі, є перешкоджання неконтрольованому поширенню інформації, запобігання втраті її або неможливості доступу до неї, і, як результат, – забезпечення безперебійної роботи організації і зведення до мінімуму шкоди від подій, що загрожують безпеці.

З погляду захисту інформації комп’ютерна система розглядається як набір функціональних послуг. Кожна послуга являє собою набір функцій, які дозволяють протистояти певним загрозам. Під час розроблення програмного забезпечення (далі – ПЗ) варто визначитися, від чого треба захищати дані в програмній системі. Це можуть бути: загрози конфіденційності (пов’язані з несанкціонованим ознайомленням з інформацією), загрози цілісності (що стосуються несанкціонованої модифікації або знищення інформації), загрози доступності (порушення можливості використання комп’ютерних систем або оброблюваної інформації) і загрози спостережливості (пов’язані з порушенням ідентифікації і контролем над діями користувачів, керуваністю комп’ютерної системи).

Вибір мови програмування та середовища розроблення під час створення вільного програмного

забезпечення важливі з погляду ефективності та вартості роботи програмістів, а також кінцевої вартості продукту. Це зумовлює актуальність дослідження питань реалізації вільного ПЗ на підтримку діяльності навчального процесу із забезпеченням належного рівня захисту конфіденційних даних. Адже в умовах сучасної жорсткої конкуренції розроблень програмного забезпечення питання коштів, які доведеться витратити на розроблення, придбання програмного продукту, є досить вагомим.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичний доробок у галузі створення та впровадження вільного програмного забезпечення, зокрема в системі освіти, є значним. Багато закордонних дослідників, серед яких Х. Браїнінк, Е. Верхалст, К. Лауверс, Р. Столмен [7; 11], та вітчизняних науковців, як-от М. Карпенко, М. Кияк, О. Кравчина, Р. Селіверстов, І. Саврас [2; 4], розглядали це питання. Аналіз досліджень дозволив дійти висновку, що сьогодні багатьма країнами визнана доцільність використання вільного програмного забезпечення в державному секторі та сфері освіти. Вільне програмне забезпечення має чимало важливих, зокрема й стратегічних, переваг, чи не найголовнішою серед яких є можливість суттєвого заощадження бюджетних коштів. Проте нормативна неврегульованість,

недостатня обізнаність населення щодо зазначеного, а також спорадичні та несистемні згадки про нього у вітчизняних медіа є найголовнішими причинами інерційності користувачів у цьому питанні.

Сучасний стан розвитку мов і середовищ програмування відображений у роботах багатьох практиків, а саме: Г. Буча, Б. Вагнера, В. Кауфмана, К. Лармана, Б. Мейсера, М. Фаулера, Б. Еккеля [1; 3; 5; 8; 10; 16] тощо. Автори розглянули фундаментальні концепції та принципи, втілені в сучасних та перспективних мовах програмування. Практиками представлені різні стилі програмування: операційний, ситуаційний, функціональний, реляційний, паралельний, об'єктно-орієнтований.

Питання захисту інформації, зокрема методи захисту даних, розробляли багато всесвітньо відомих криптографів, як-от: М. Дік, К. Гентрі, Ш. Гелеві, Р. Рівест [9]. Такими науковцями, як: М. Баварський, Б. Газі, М. Судан, Р. Рівест та ін. [12; 14], запропоновано гомоморфні методи шифрування, оптимізації коляративних вибірок, оборотність виключної диз'юнкції для двійкових кортежів тощо. Зазначені методи застосовуються для модифікації способів захисту й унеможливлення несанкціонованого доступу до даних.

Спираючись на сучасні розробки провідних криптографів і логічний аналіз потенційних вразливостей даних ПЗ, дійшли висновку, що питання захисту інформації в сучасних ІС висвітлено достатньо, але для вирішення проблеми вибору методу та способів захисту даних у розробленому програмному забезпеченні здебільшого вирішальним чинником є власні знання та досвід програміста.

Постановка завдання. Метою статті є модернізація програмного продукту з відкритим кодом для обліку відомостей про студентів вищого навчального закладу та їхньої успішності з навчальних дисциплін "StudBD" v 1.0 на посилення криптографічного складника. Останнє зумовило завдання даної статті, а саме:

1. Провести аналіз криптографічних методів шифрування та дешифрування даних.
2. Розробити захищену процедуру автентифікації користувачів засобами мови Qt для ПЗ "StudBD" v 1.0.
3. Надати опис логіки шифрування даних опрацьовуваних програмним продуктом.

Виклад основного матеріалу дослідження. Проведений у [6] аналіз наявних систем, спрямованих на підтримку роботи навчального закладу, як-от АС «Деканат» Науково-дослідного інституту прикладних програмних інформаційних тех-

нологій, м. Київ, та пакету програм «Деканат» фірми «Політек-софт» дозволив дійти висновку, що зазначені програмні засоби забезпечують автоматизацію обліку роботи навчального закладу, але кожна з них є платною, що знижує їхню конкурентоспроможність для навчальних закладів у сучасних умовах. У зв'язку із цим спробували створити заміник цим платним аналогом, беручи до уваги переваги вільного програмного забезпечення.

2014 р. нами розроблено ПЗ "StudBD" v 1.0, що є клієнт-серверним програмним продуктом, написаним на діалекті мови програмування C++ комплексного середовища Qt. Основними перевагами програмної системи "StudBD" v 1.0, на нашу думку, є її відкритість, багатоплатформеність та використання бібліотеки Qt. У своїй основі пропонує програмна система має інтерфейс для роботи користувачів (розроблений у середовищі Qt), базу даних (MySQL). До складу програмного продукту входить модифікований стандартний компонент QTableWidgetItem (додана можливість виділення рядків та реалізований сигнал реагування на подвійний клік лівої кнопки миші), який можна використовувати в подальшому масштабуванні інших відкритих програмних продуктів.

Основні характеристики ПЗ "StudBD" v 1.0 надані в [6]. Пропонуваний програмний продукт "StudBD" v 1.0 підпадає під відкриту ліцензію GPL, яка передбачає повний доступ до сирцевих кодів розроблення програмного забезпечення, база даних теж має права GPL, що забезпечує вільний доступ до модифікації структури бази даних.

Варто взяти до уваги такий вагомий складник створення програмного продукту, як забезпечення захисту інформації, особливо коли це стосується персональних даних. У процесі реалізації даної програмної системи ми вважаємо це за важливе, тому розширили можливості першої версії ПЗ на ускладнення несанкціонованого доступу до оброблюваної інформації додатка.

Розглянемо криптографічні методи шифрування та дешифрування даних. Криптографія – це сукупність методів, стандартів і протоколів кодування, покладених на посилення та зберігання даних. Розглянемо найбільш поширені алгоритми шифрування та дешифрування даних. RSA [15] побудований на принципі складності факторизації, криптографічна система, яка використовує два ключі – відкритий і секретний, які разом утворюють пари ключів. Відкритий ключ можна зберігати у відкритому вигляді – він використовується для шифрування даних. Якщо повідомлення було

зашифроване відкритим ключем, то розшифрувати його можна тільки відповідним секретним ключем.

Генерація ключів. Для генерування пари ключів треба:

- а) обрати два великих простих числа p та q ;
- б) обчислити їхній добуток $n = pq$;
- в) обчислити функцію Ейлера $\varphi(n) = (p-1)(q-1)$;
- г) обрати ціле e , таке, що $1 < e < \varphi(n)$ та e взаємно просте із $\varphi(n)$;

е) за допомогою розширеного алгоритма Евкліда знайти число d , таке, що $ed \equiv 1 \pmod{\varphi(n)}$.

Число n називається модулем, а числа e і d – відкритою й секретною експонентами відповідно. Пари чисел (n, e) є відкритою частиною ключа, а (n, d) – секретною. Числа p і q після генерації пари ключів можуть бути знищені, але в жодному разі не повинні бути розкриті.

Шифрування й дешифрування. Щоб зашифрувати повідомлення $m < n$, обчислюється $c = m^e \pmod{n}$.

Число c і використовується як шифр тексту. Для розшифрування потрібно обчислити $m = c^d \pmod{n}$.

Неважко перекопатися, що під час розшифрування ми відновимо вихідне повідомлення: $c^d \equiv (m^e)^d \equiv m^{ed} \pmod{n}$.

З умови $ed \equiv 1 \pmod{\varphi(n)}$ виходить, що $ed = k\varphi(n) + 1$ для деякого цілого k , отже, $m^{ed} \equiv m^{k\varphi(n)+1} \pmod{n}$.

Згідно з теоремою Ейлера:

$$m^{\varphi(n)} \equiv 1 \pmod{n},$$

тому

$$m^{k\varphi(n)+1} \equiv m \pmod{n};$$

$$c^d \equiv m \pmod{n}.$$

Цифровий підпис. RSA може використовуватися не тільки для шифрування, але й для цифрового підпису. Підпис s повідомлення m обчислюється з використанням секретного ключа за формулою:

$$s = m^d \pmod{n}.$$

Для перевірки правильності підпису потрібно перекопатися, що виконується рівність:

$$m = s^e \pmod{n}.$$

SSL [13] – криптографічний протокол, який забезпечує встановлення безпечного з'єднання між клієнтом і сервером. SSL спочатку розроблений компанією Netscape Communications. Згодом, на підставі протоколу SSL 3.0, був розроблений і ухвалений стандарт RFC – TLS.

Протокол забезпечує конфіденційність обміну даними між клієнтом і сервером, що використовують TCP / IP, причому для шифрування вико-

ристовується асиметричний алгоритм із відкритим ключем. Для шифрування з відкритим ключем використовується два ключі, будь-яким із них можна шифрувати повідомлення. Якщо для шифрування використовується один ключ, то для розшифровки потрібен інший. У такій ситуації можна отримувати захищені повідомлення, тобто публікувати відкритий ключ, а секретний зберігати в таємниці.

Протокол SSL складається із двох підпротоколів: SSL запису і стиснення. Протокол SSL запису визначає формат, який застосовується для передачі даних. Протокол SSL включає стиснення з використанням протоколу SSL запису для обміну серіями повідомлень між сервером і клієнтом під час встановлення першого з'єднання. Для роботи SSL потрібно, щоб на сервері був SSL-сертифікат.

SSL надає канал, що має три основні властивості [13], як-от:

Аутентифікація. Сервер завжди автентифікований, тоді як клієнт автентифікований залежно від алгоритму.

Цілісність. Обмін повідомленнями передбачає перевірку цілісності.

Конфіденційність каналу. Шифрування використовується після встановлення з'єднання і для всіх наступних повідомлень.

У протоколі SSL всі дані передаються у вигляді записів-об'єктів, що складаються із заголовка і переданих даних. Передача починається із заголовка. Заголовок містить або два, або три байти коду довжини. Якщо старший біт у першому байті коду дорівнює одиниці, то запис не має заповнювача, повна довжина заголовка дорівнює двом байтам, інакше запис містить заповнювач, а повна довжина заголовка дорівнює трьом байтам. Код довжини запису не включає в себе число байтів заголовка. Довжина запису двобайтового заголовка (зразок подано мовою Java):

$$RecLength = (byte [0] \& 0x7F \ll 8) | byte [1].$$

Тут $byte [0]$ і $byte [1]$ – перший і другий отримані байти.

Довжина запису трибайтового заголовка:

$$RecLength = (byte [0] \& 0x3F \ll 8) | byte [1];$$

$$Escape = (byte [0] \& 0x40) \neq 0;$$

$$Padding = byte [2];$$

Тут $Padding$ визначає число байтів, доданих відправником до початкового тексту для того, щоб зробити довжину запису кратною розміру блока шифру за використання блокового шифру.

Тепер відправник «заповненого» запису додає заповнювач до наявних даних і шифрує все це. Причому вміст заповнювача жодної ролі не відіграє.

Оскільки обсяг переданих даних відомий, заголовок може бути сформований з урахуванням *Padding*.

У свою чергу, одержувач запису дешифрує все поле даних і отримує повну вихідну інформацію. Потім обчислюється значення *RecLength* за відомим *Padding*, і заповнювач із поля даних видаляється. Дані запису SSL складаються із трьох компонентів:

1. *MAC_Data [Mac_Size]* – (Message Authentication Code) – код аутентифікації повідомлення.

2. *Padding_Data [Padding]* – дані заповнювача.

3. *Actual_Data [N]* – реальні дані.

Коли записи надсилаються відкритим текстом, очевидно, що жодні шифри не використовуються. Тоді довжини *Padding_Data* і *MAC_Data* дорівнюють нулю. За шифрування *Padding_Data* залежить від розміру блока шифру, а *MAC_Data* залежить від вибору шифру. Приклад обчислення *MAC_Data*:

$$MacData = Hash (Secret, Actual_Data, Padding_Data, Sequence_Number).$$

Значення *Secret* залежить від того, хто (клієнт або сервер) посилає повідомлення. *Sequence Number* – лічильник, який інкрементується як сервером, так і клієнтом. Тут *Sequence Number* є 32-бітовим кодом, який передається хеш-функції у вигляді 4-х байтів, причому першим передається старший байт. Для *MD2*, *MD5* *MAC_Size* дорівнює 16 байтам (128 бітам). Для двобайтового заголовка максимальна довжина запису дорівнює 32 767 байтам, а для трибайтового заголовка – 16 383 байти.

Виконаний аналіз дозволив розробити захищену процедуру автентифікації користувачів.

Програмна система “StudBD” v 2.0, якщо порівнювати з версією “StudBD” v 1.0, модифікована нами додаванням функцій шифрування оброблювальних даних додатка на всіх етапах роботи з даними користувачів.

У програмному продукті “StudBD” v 2.0 розроблена система автентифікації без явного збереження пароля на пристрої користувача. Початковий вхід у програмне середовище “StudBD” здійснюється заповненням полів початкової форми (рис. 1) – «Логін» і «Пароль». За відсутності облікового запису в БД системи надається можливість створення нового облікового запису (рис. 2).

Під час автентифікації програмний продукт генерує зашифрований ключ, який є як ключем доступу до програмного продукту, так і ключем відображення інформації, до якої має доступ окремий користувач. Програмну реалізацію зазначених дій представлено на рис. 3.

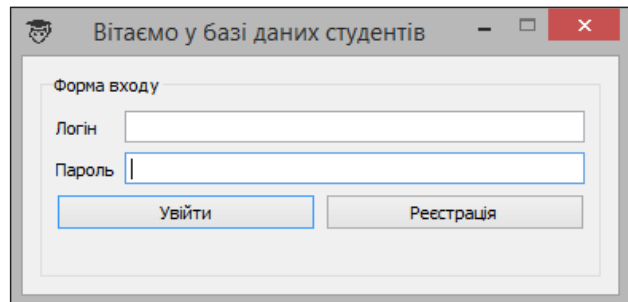


Рис. 1. Початкова форма входу

Ім'ям користувача є зашифрований ключ, згенерований на етапі реєстрації (див. рис. 2).

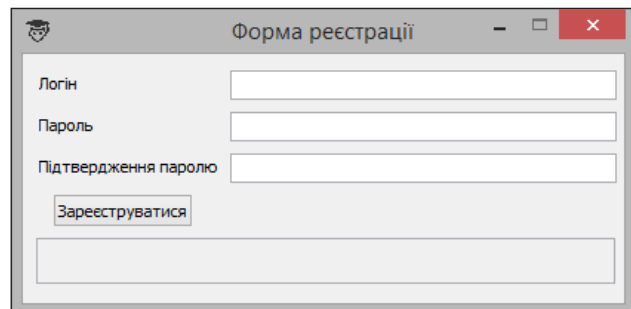


Рис. 2. Вікно створення облікового запису

Завдяки відсутності збереженої локальної копії пароля та шифруванню самих токенів доступу до всієї інформації досягається високий рівень захисту даних, згенерованих програмним продуктом.

Опишемо розроблену логіку шифрування даних, опрацьовуваних додатком. Для шифрування даних у “StudBD” v 2.0 застосовується криптографічний алгоритм RSA. Безпека алгоритму RSA зумовлена принципом складності факторизації цілих чисел. Алгоритм використовує два ключі – відкритий (*public*) і секретний (*private*), відкритий і відповідний йому секретний ключі разом утворюють пари ключів (*key pair*). Відкритий ключ не потрібно зберігати в таємниці, він використовується для шифрування даних. Якщо повідомлення було зашифровано відкритим ключем, то розшифрувати його можна тільки відповідним секретним ключем.

Висновки. Проведений аналіз криптографічних методів шифрування та дешифрування даних дозволив виконати модернізацію програмного продукту “StudBD” v 1.0 на підтримку обліку відомостей студентів навчальних закладів та їхньої успішності з навчальних дисциплін. Порівняно з версією 1.0 програмного продукту “StudBD” (2015 р.) до версії 2.0 були додані функції, що унеможливають несанкціонований доступ до даних, оброблюваних у додатку. Завдяки цьому

```

boolean isLogin() {
    String ConcatPassword = "";
    ConcatPassword = Md5Util.md5(first.getText().toString() +
second.getText().toString() + thirt.getText().toString() + fourth.getText().toString());
    sPref = getSharedPreferences("users", MODE_PRIVATE);
    SharedPreferences.Editor ed = sPref.edit();
    String PasswordFromPreferences = sPref.getString(USER_CREATE, "");
    Toast.makeText(this, ConcatPassword.equals>PasswordFromPreferences) ?
"Вітаннячка!" : "Введіть валідний пароль", Toast.LENGTH_LONG).show();
    if (ConcatPassword.equals>PasswordFromPreferences) {
        return true;
    } else {
        return false;
    }
}
}

```

Рис. 3. Програмна реалізація створення нового облікового запису

програмний продукт забезпечує: адміністрування (управління програмною системою користувачами; зміну, редагування, створення сесій; додавання та редагування напрямів підготовки; редагування списку факультетів навчального закладу; редагування, зміну та створення дисциплін); збе-

рігання й оброблення інформації за студентами; додавання інформації про студентів; зберігання інформації щодо сесій. Під час модернізації програмного продукту особливу увагу приділено забезпеченню захисту інформації, обробленню та зберігання персональних даних.

У процесі модернізації у версії 2.0. розроблено систему доступу за токеном, без необхідності збереження паролів на пристрої користувача. Додаток генерує унікальні ключі для кожного користувача, що додає стійкості перед несанкціонованим доступом. Вся внесена конкретним користувачем інформація шифрується, доступ до неї уможливується тільки за знання пароля доступу до програмного продукту конкретного користувача програмної системи.

До перспективного напрямку подальшого розвитку пропонованого програмного продукту "StudBD" v 2.0 відносимо можливість реалізації функціоналf програмної системи із застосуванням хмарних технологій.

Список літератури:

1. Буч Г. Объектно-ориентированный анализ и проектирование. М: Вильямс, 2008. 720 с.
2. Карпенко М. Перспективи та можливості впровадження вільного програмного забезпечення в навчальних закладах та державних установах України. URL: <http://old.niss.gov.ua/Monitor/june2009/15.htm/>.
3. Кауфман В. Языки программирования. Концепции и принципы. М.: ДМК Пресс, 2010. 464 с.
4. Кравчина О. Основні напрями використання вільного програмного забезпечення в закладах освіти зарубіжжя. URL: <http://archive.nbuv.gov.ua/e-journals/ITZN/em20/content/10kojaie.htm>.
5. Ларман К. Применение UML 2.0 и шаблонов проектирования. Введение в объектно-ориентированный анализ, проектирование и итеративную разработку. СПб.: Вильямс, 2013. 736 с.
6. Погромська Г., Христордов О. Реалізація вільного програмного забезпечення засобами комплексного середовища розробки міжпатформових додатків Qt // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2015. № 1 (50). С. 224–232.
7. Столмен Р. Свободные программы в учебных заведениях. Операционная система GNU. URL: <http://www.gnu.org/education/edu-schools.html>.
8. Страуструп Б. Язык программирования C++. М: Бином; Невский диалект, 2008. 1136 с.
9. Dijk M. Fully Homomorphic Encryption over the Integers. URL: https://www.researchgate.net/publication/220335489_V_Fully_Homomorphic_Encryption_over_the_Integers.
10. Eckel B. Thinking in Java. Prentice Hall Ptr, 2006. 1079 p.
11. Free Soft ware in education Advise, vision and propose daction plan / Herman Bruyninckx, Mark de Quid, Wilfried Feijens, Kim Lauwers, Eric Verhulst. URL: http://www.ond.vlaanderen.be/ict/english/free_software_in_ed_Flemish_Community_advise.pdf.
12. Mohammad B. Ghazi B. Haramaty E. The Optimality of Correlated Sampling. Electronic Colloquium on Computational Complexity. 2016. № 194. URL: <https://eccc.weizmann.ac.il/report/2016/194/>.
13. Open SSL Cryptography and SSL / TLS Toolkit. URL: <https://www.openssl.org/docs/faq.html>.
14. Rivest R. The invertibility of the XOR of rotations of a binary word. International Journal of Computer Mathematics. 2009. № 21. P. 281–284. URL: <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207161003596708>.
15. RSA 21st century enlightenment. URL: <https://www.thersa.org/>.
16. Wagner B. Effective C# (Covers C# 4.0): 5.0 Specific Ways to Improve Your C#. Addison-Wesley Professional, 2010. 352 p.

ШИФРОВАНИЕ ДАННЫХ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ СОЗДАНИЯ СВОБОДНОГО ПРОГРАМНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

В статье представлены особенности реализации алгоритма криптографического метода шифрования / дешифрования данных RSA, описаны характеристики и технология криптографического протокола SSL. Разработана защищенная процедура аутентификации пользователей средствами языка Qt для модернизация программного продукта "StudBD" v 1.0 с открытым кодом для учета сведений о студентах вуза и их успеваемости по учебным дисциплинам для усиления криптографической составляющей. Представлено описание логики шифрования данных, обрабатываемых программным продуктом.

Ключевые слова: база данных, свободное программное обеспечение, шифрование данных, Qt, C ++, RSA, SSL.

THE DATA ENCRYPTION AS OPERATION COMPONENT OF THE CREATION OF THE FREE SOFTWARE IN EDUCATIONAL PROCESS

The article deals with the features of implementation of the cryptographic technique algorithm of encrypting/ decrypting RSA data and describes the characteristics and technology of SSL cryptographic protocol. It was designed the users authentication procedure by means of the Qt language for upgrading of software product "StudBD" v 1.0 with the open code for the accounting of information about university students and their achievement of academic disciplines to strengthen the cryptographic component. It is provided the description of data encryption logic processed by a software product.

Key words: database, the free software, data encryption, Qt, C ++, RSA, SSL.

Прищеп С.В.

Інститут проблем реєстрації інформації
Національної академії наук України

ВИЯВЛЕННЯ НОВИХ ПОДІЙ НА ОСНОВІ РЕЙТИНГУВАННЯ ДЖЕРЕЛ У TWITTER

У статті вивчаються методи виявлення нових подій з інформаційного потоку глобальної мережі Інтернет. Пропонується підхід до виявлення нових подій із використанням методу рейтингування джерел інформації всередині соціальної мережі Twitter. Запропонований метод дає можливість зменшити витрати на моніторинг джерел і необхідні потужності для оброблення і виявлення нових подій. А перерозподіл рейтингу джерел збільшує повноту і точність вибірки із плином часу. Для традиційних методів екстрагування нових подій характерні проблеми швидкості виявлення і необхідність у накопиченні й обробленні надвеликих масивів даних. Цю проблему вирішує створення і моніторинг найбільш рейтингових джерел соціальної мережі з найбільшою кількістю нових подій щодо всієї кількості повідомлень.

Ключові слова: екстрагування подій, рейтингування джерел, обробка тексту, Twitter, інформаційний потік.

Постановка проблеми. В одній з найбільших соціальних мереж світу – Twitter – щомиті публікуються тисячі матеріалів. Деякі з них цікаві з погляду інформаційності. Але через величезну кількість авторів доводиться працювати з надто великою кількістю даних, що уповільнює й ускладнює виявлення в інформаційному потоці цінних повідомлень (твітів), які потенційно можуть бути новими, невиявленими раніше подіями. Оскільки твіти мають коротку форму, а користувачам не потрібно структурувати текст та стиль повідомлення і чекати модерації, то вони мають перевагу в швидкості поширення й оновлення актуальної інформації. Також варто зазначити, що локальні події, незначні в масштабі країни, але значущі для окремих невеликих локацій та їхніх жителів, теж активно поширюються через дану соціальну мережу, на відміну від засобів масової інформації (далі – ЗМІ). Саме тому для розроблення моделі вилучення нових подій з інформаційних потоків обрана саме ця соціальна мережа. Мінусами можна вважати велику кількість шуму і неправдивої інформації в даному інформаційному потоці.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Приклади якісного виявлення подій описувались нами й іншими вченими в інших статтях. Науковці з усього світу працюють над створенням і вдосконаленням систем виявлення подій, тематики, трендів, емоційності повідомлень з інформаційних потоків. Приклади охоплюють як

підходи на основі правил, так і різні статистичні підходи.

Наприклад, система екстрагування подій АТТ1, що досягла найкращих результатів на TempEval-3 2013 р., базується як на семантиці текстів, так і на синтаксичному розборі їх. Система виявлення подій АТТ1 більше спирається на лексичні, ніж на семантичні особливості в тексті. Вона працює на підході послідовного позначення (sequence labeling) [1, с. 20–24].

В описі свого методу та системи виявлення подій “Niagarino” Андреас Вейлер та інші вчені зазначають, що після попереднього оброблення інформаційного потоку Tweeter призначає методом зворотної частоти документа кожному слову спеціальну оцінку за весь час, а потім найбільш топові терми використовуються для побудови зв’язку, терміни навколо цих термів теж беруться до уваги та мають свою оцінку за IDF-методом. Далі вчені використовують LDA-метод, незважаючи на те, що він зазвичай застосовується для присвоєння категорій, але тут його використовують для визначення – подія / не подія [2, с. 38–40].

Х. Бекер та інші вчені запропонували 2011 р. свій метод виявлення на основі технік кластеризації. Їхній підхід полягає в безперервній кластеризації схожих твітів та розподілі їхнього контенту на «події» та «не події» завдяки методу опорних векторів [3, с. 438–441].

Постановка завдання. У статті ми пропонуємо метод виявлення нових подій зі скороченої кількості джерел, що забезпечує зменшення часу / витрат на виявлення нових подій у потоці повідомлень Twitter.

На рис. 1 зображено графік появи документів у категорії дорожньо-транспортних пригод (далі – ДТП) з наявними в них тригерами подій. На рис. 2 темними кружками виділені нові виявлені події.

Теорія методу полягає в тому, що в мережі Twitter є певний список найбільш рейтингових (подієвих) джерел: акаунти новинних сайтів, ЗМІ, національних лідерів, активістів тощо. Багато з їхніх постів – важливі нові події. Отже, сформувавши список таких джерел (авторів) і оновлюючи його з деякою періодичністю, можна досягти результату, коли 20% локальних джерел охоплюють 80–95% цінних нових подій, що публікуються в мережі. Такий розподіл дає можливість моніторити і виявляти нові події тільки в їхніх твітах, в отже, зменшує скановану базу майже на 80% джерел. Наша попередня експериментальна оцінка показує, що такий підхід працює та підвищує швидкість виявлення і зменшує ресурси, необхідні для сканування.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для повноцінної роботи за таким методом спочатку необхідно сформувати список ключових запитів до Twitter за визначеною категорією, наприклад, «Кібербезпека». Сформувавши список основних запитів (понад 100 запитів) за заданою тематикою, ми зробили вивантаження всіх твітів

за 1 рік, в яких містилися ключові запити щодо такої тематики та їхніх авторів (джерел). Маючи таку базу даних про твіти, їхній вміст і джерела, ми намагаємося екстрагувати тільки ті твіти, які є подіями. Подія – значна подія певної категорії, явище чи інша діяльність як факт суспільного або особистого життя. Нас цікавлять події, де є хоча б один фігурант, що її вчинив, – суб’єкт, або фігурант, щодо якого її вчинили – об’єкт події. Ми розглядаємо задачу виявлення подій як екстрагування індикаторів (тригерів) подій заданих типів і виявлення їхніх аргументів, зв’язку з фігурантами в реченні. Потім відібрана інформація про ці події має бути розпізнана й об’єднана в єдине уявлення для кожної виявленої події конкретної категорії.

Оскільки більшість подій мають контекстно залежне відношення і більшість із них згадуються лише в декількох документах, написаних протягом якогось часового інтервалу, то використовуємо спеціальні шаблони і словники. Для кожної категорії створюємо свій шаблон поведінки і словники видобутку подій певної категорії. Присвоєння певної категорії документу здійснюється методом опорних векторів. Далі розбиваємо тексти на ключові слова і фрази. Кожному ключовому слову присвоюємо значення для даної предметної області за методом TF-IDF.

Для виявлення подій, їхніх суб’єктів і об’єктів, ми створюємо спеціальні шаблони правил розбору пропозицій із певної тематики і словники індикаторів подій із певної теми, які заповнюються з експертом з урахуванням різних лінгвістичних ознак

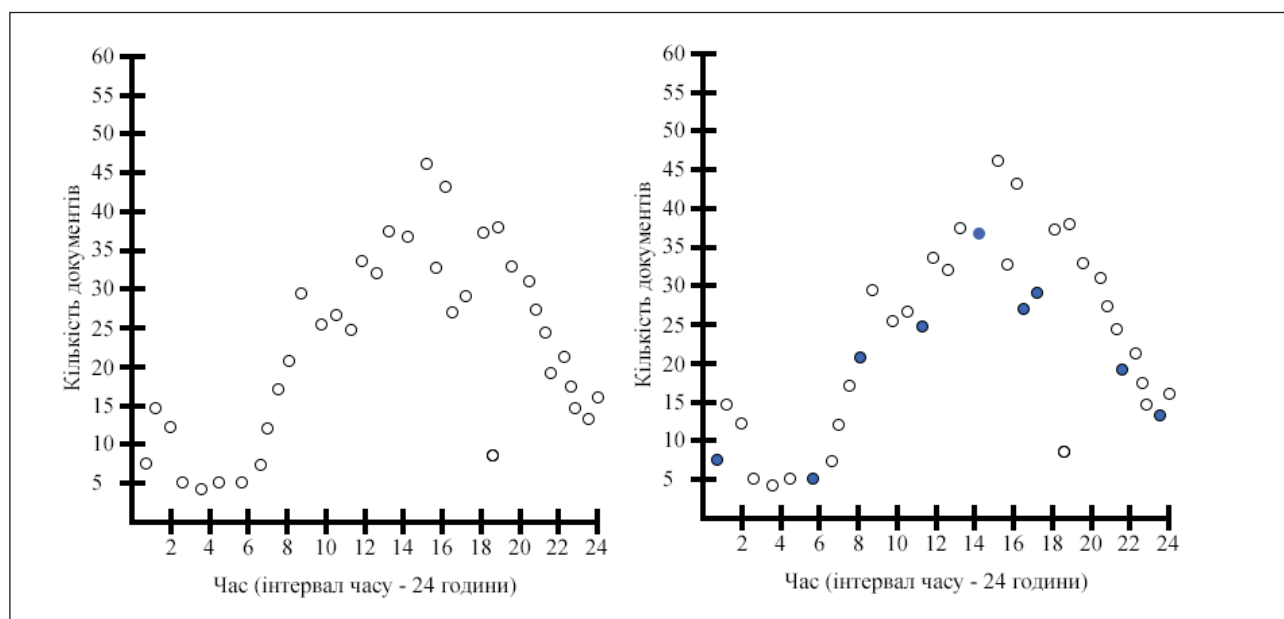


Рис. 1. Поява документів за темою ДТП

Рис. 2. Нові події в категорії ДТП

Приклад частини таблиці рейтингу джерел за тематикою

iD	Назва-посилання	Загальна кількість твіттів за N часу	Кількість твіттів із подією за N часу	Кількість твіттів із новою подією за N часу	% ефективності
237	@poroshenko	89	61	49	68,539
238	@interfaxua	9 720	1 276	576	13,127
239	@APUkraine [†]	630	158	114	25,079
240	@CrimeUA [†]	990	489	221	49,393
241	@news112ua [†]	7 863	1 298	648	16,507
242	@kommersant_ua [†]	8 100	1 174	583	14,493
243	@rbc_ukraine [†]	4 500	918	329	20,4

теми (категорії). Індикатори тематичної події представлені словниками. Використовується не один словник індикаторів подій із певної теми, а два. Індикатори події виділяємо пошуком індикаторів у пропозиціях документа з одного зі словників присвоєної документу категорії. Використання подвійних словників дозволяє надати індикатору події спеціальний аргумент приналежності до одного зі словників, що дозволяє будувати більш складні шаблони умов, вивести показники точності вилучення подій на більш високий рівень.

Ми підходимо до питання вилучення подій як до виявлення індикаторів (тригерів) події заданих типів і виявлення їхніх аргументів, зв'язку з фігурантами в реченні. Потім відібрана інформація про ці події розпізнається й об'єднується в єдиному поданні для кожної виявленої події.

Визначимо подію e як кортеж (сутність і дата) + згадування про e , m_e – може бути твіт, що містить посилання на сутність і написаний у специфічну конкретну дату. Особливості події екстрагуємо зі згадок про подію:

$$x_e = f(\{m_{e'} | e' = e\}),$$

які можуть бути використані для оцінки ймовірності того, що подія належить до категорії E , згідно з деякими заданими параметрами для категорії θ_E :

$$p_{\theta_E}(y_e = 1 | x_e) = \frac{1}{1 + e^{-\theta_E \cdot x_e}}.$$

Якщо в реченні знайдений індикатор події і хоча б один фігурант, то здійснюється подальший розбір речення – нумерація порядку всіх слів у реченні і присвоєння кожному слову свого порядкового номера. Коли всім сутностям присвоєні типи, аргументи і порядковий номер у реченні, то підбирається тип шаблону, якому відповідає дане речення з подією. Варіанти шаблонів: індикатор тематичної події одного зі словників і варіанти розташування інших перемінних в реченні документа певної категорії. Шаблони для словників № 1 і № 2 відрізняються.

Виявлення нових подій за таким алгоритмом з величезного масиву документів Twitter – вельми довге і ресурсовитратне завдання, тому ми дійшли висновку, що необхідно поліпшити даний підхід за допомогою рейтингування джерел Twitter для кожної з категорій предметної області.

Для цього, виявивши події і їхніх авторів, ми будемо рейтинг джерел певної категорії. Рейтинг являє собою ідентифікатор джерела, назву джерела, кількість всіх документів (твіттів) від даного джерела за N часу, кількість твіттів-подій за N часу, показник ефективності даного джерела. Показник ефективності джерела – це співвідношення твіттів-подій до загальної кількості твіттів цього джерела * 100. $N = 3$ місяці від поточної дати.

Із рейтинга для більш ніж 1850 джерел ми побачили, що ~ 20% джерел мають справді високий показник подійності. Отже, залишено лише 270 джерел, за якими йде моніторинг подій і виявлення їхньої новизни.

Це кардинально вирішило проблему швидкості оброблення, виявлення нових подій і масштабів споживаних для цього ресурсів. Водночас повнота майже не страждає. Отже, наш метод можна розділити на такі етапи:

1. Первинне виявлення твіттів за заданою категорією і їх попереднє оброблення.
2. Другий етап передбачає кластеризацію і розподіл твіттів на групи (категорії).
3. Виявлення подій у базі твіттів визначеної категорії.
4. Аналіз найбільш значущих джерел даних твіттів, % їхньої ефективності (подійності) і присвоєння рейтингу джерелам.
5. Подальший моніторинг і екстрагування подій тільки з рейтингових джерел протягом певного часу.
6. Порівняння даних про подію з минулими подіями з бази даних (далі – БД) подій, зважування всіх аргументів і ухвалення рішення про новизну події.

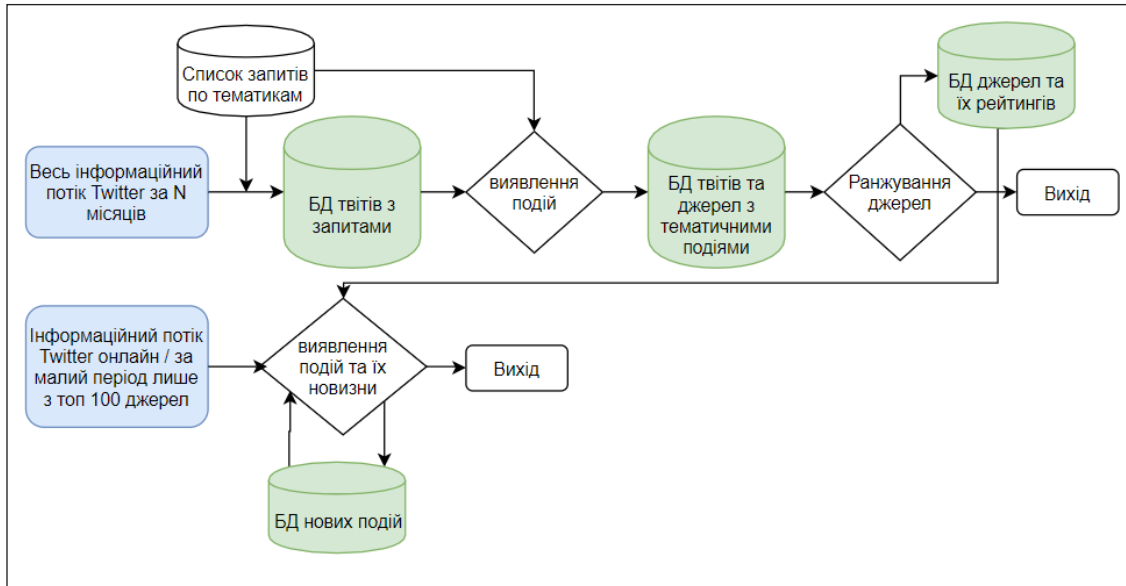


Рис. 3. Схема роботи системи рейтингування джерел та екстрагування нових подій

7. Аналіз ефективності найбільш рейтингових джерел, повторний аналіз значущості джерел і перерозподіл рейтингу в певний проміжок часу.

На етапі виявлення подій першим кроком в аналізі тексту з використанням статистичних моделей (алгоритмів) є перетворення тексту на числа. Для наших аналітичних методів ми зробили це шляхом підрахунку кількості документів, які містять даний термін (ключове слово) у документах певної категорії. А для кожного документа визначена мітка часу, що дозволяє зробити аналіз тимчасовим. Для забезпечення можливості багатокритеріального порівняння подій і повідомлень у соціальних мережах модель події має містити компоненти, що відображають різні її аспекти. Це дає можливість виявляти саме нові події:

$$\lambda = \langle M_i^m, W_i^w, T_i^t, S_i^s, B_i^b, Z_i^z, P_i^p, G_i^g, C_i^c \rangle.$$

Модель події складається з таких компонентів:

1. Множина повідомлень, що описують подію, – $M_i^m = (m_i^1, m_i^2, m_i^3, \dots, m_i^{N_i})$.
2. Вектор слів документа, що описує подію, – $W_i^w = (w_i^1, w_i^2, w_i^3, \dots, w_i^{N_i})$.
3. Вектор заголовків документа, що описує подію, – $T_i^t = (t_i^1, t_i^2, t_i^3, \dots, t_i^{N_i})$.
4. Вектор слів у реченні – $S_i^s = (s_i^1, s_i^2, s_i^3, \dots, s_i^{N_i})$.
5. Множина числових значень (дат) із текстів документів – $B_i^b = (b_i^1, b_i^2, b_i^3, \dots, b_i^{N_i})$, метадані про час та дату – $Z_i^z = (z_i^1, z_i^2, z_i^3, \dots, z_i^{N_i})$.
6. Множина осіб (фізичних та юридичних), пов'язаних із подією, – $P_i^p = (p_i^1, p_i^2, p_i^3, \dots, p_i^{N_i})$.
7. Множина локацій – $G_i^g = (g_i^1, g_i^2, g_i^3, \dots, g_i^{N_i})$.
8. Приналежність до однієї з тем (категорій) – $C_i^c = (c_i^1, c_i^2, c_i^3, \dots, c_i^{N_i})$.

Опорні слова для кожної категорії з показником Strange (EDF) та список слів для кожної категорії документів із поліченою за TF-IDF вагою кожного зі слів для певної категорії дають змогу обчислити вагу всього документа. Strange (EDF) визначається як просте відношення кількості знайдених документів із подією з даним тригером події (E_w) до кількості всіх документів у вибірці певної категорії з даним ключовим словом (D_w):

$$EDF_w = \frac{E_w}{D_w}.$$

TF-IDF обчислюємо за загальною прийнятою формулою:

$$tf - idf(w, d, D) = tf(w, d) \times idf(w, D);$$

$$tf(w, d) = \frac{n_w}{\sum_k n_k},$$

де n_w – кількість входжень слова w у документ, а знаменник – загальна кількість слів у документі.

$$idf(w, D) = \log \frac{|D|}{|\{d_i \in D | w \in d_i\}|},$$

де $|D|$ – кількість документів у корпусі, а $|\{d_i \in D | w \in d_i\}|$ – кількість документів із колекції D , в яких трапляється слово w . У разі роботи з текстами великого і малого розміру одночасно проводимо подвійну нормалізацію частоти появи так, що частота появи терміна w :

$$TF_w = 0.5 + 0.5 \times \frac{C_w}{B},$$

де C_w – кількість вживань терміна w у тексті; B – кількість разів, коли трапився найчастотніший термін цього тексту.

Даний вид вимірювання TF нівелює можливу помилку, спричинену впливом розміру тексту.

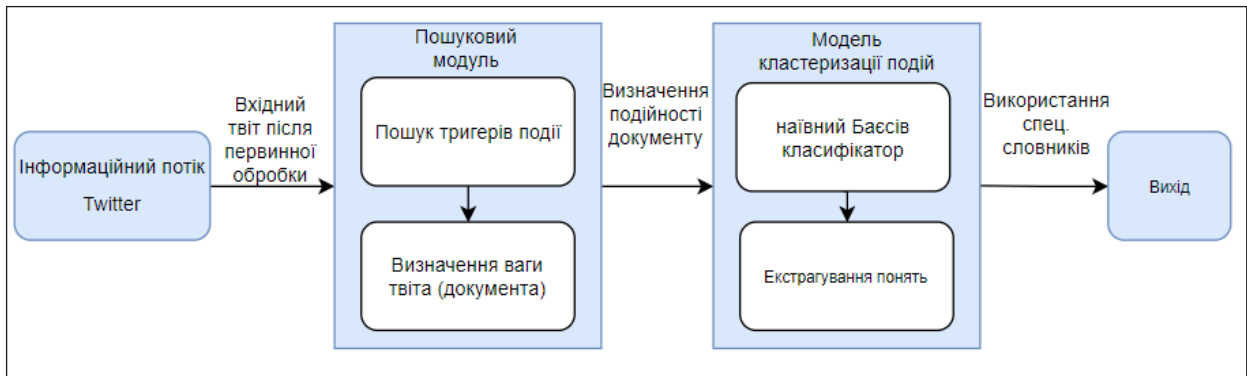


Рис. 4. Схема роботи системи екстрагування нових подій

Наступний крок аналізу документа, в якому знайдений індикатор події (тригер), коли вага документа більше порогового значення – виявлення понять (аргументів) у документі, порівняння цих показників із наявними новими подіями. Алгоритми виявлення понять, сутностей та їх взаємозв’язків детально описані в публікації А. Додонова та Д. Ланде [5, с. 45–51].

Для екстрагування понять використовуємо спеціальні словники для кожного типу понять, а також спеціальні правила (шаблони) їх розбору. Завдяки порівнянню можливої нової події з базою вже накопичених минулих подій з’являється можливість статистичного моделювання розвитку трендів та виявлення пікових показників певної події. А це, у свою чергу, дозволяє виявляти ключові теми для кожної з категорій за певний проміжок часу, кластеризувати документи як доповнення до наявних подій у БД. Оскільки кожен документ із вагою, більшою за порогове значення, розбирається на спеціальні (аргументи) поняття, то можна обчислити відстань між цим документом і минулими подіями з бази даних. Для цього кожен документ має бути представлений аналогічною багатокритеріальною моделлю:

$$d_j = \langle M_j^m, W_j^w, T_j^t, S_j^s, B_j^b, Z_j^z, P_j^p, G_j^g, C_j^c \rangle.$$

Для порівняння компонентів моделі наявної в БД події та нового документа, що представлені векторами (ключові слова, тригери події, заголовки), використовуємо косинусну міру:

$$\kappa_{i,j}^w = 1 - \frac{\sum_{k=1}^{N^w} [w_i^k w_j^k]}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N^w} (w_i^k)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^{N^w} (w_j^k)^2}}.$$

Для порівняння інших компонент, що представлені множинами, використовуємо міру входження:

$$\kappa_{i,j}^w = 1 - \frac{|\lambda_i^n \cap d_j^n|}{|d_j^n|}.$$

У нашому разі деякі множини зважені (фізичні й юридичні особи, географічні локації тощо), тому замість кількості елементів ми звертаємо увагу на їхню вагу:

$$\kappa_{i,j}^w = 1 - \frac{\sum_{e \in \lambda_i^n \cap d_j^n} e}{\sum_{e \in d_j^n} e}.$$

Результатом порівняння документа d_j та події із БД подій λ_i є вектор, кожен елемент якого ввідобрює відстань між d_j та λ_i за деяким критерієм. Задача визначення показників відстані вирішується машиною опорних векторів (SVM), що навчається на базі прикладів пар «подія: документ, що ввідноється до події» та «подія: документ, що не ввідноється до події». Усі вхідні документи або прив’язуються до наявних у БД подій, або самі визначаються як нові події. Водночас кожен новий документ d_j порівнюємо з кожним значенням знайдених раніше нових подій λ_i та знаходимо значення відстані між d_j та λ_i . Знаходимо подію із БД подій, що є найбільш близькою до d_j . Якщо відстань між документом і подією менша, ніж порогове значення, то відносимо цей документ до події. Якщо відстань більша за порогове значення, то створюємо в БД нових подій новий запис, що на даному етапі буде представлений лише цим документом (подією).

Висновки. Зменшення бази моніторингу завдяки ранжуванню джерел (авторів) за показником їхньої ефективності використання для виявлення нових подій у соціальній мережі Twitter – це швидкий і ефективний підхід. Дослідження показало, що повнота подій лише в найбільш рейтингових подіях задовольняє наші потреби в повноті та точності виявлення нових подій із даного інформаційного потоку. Завдяки роботі лише з найбільш рейтинговими джерелами можлива робота методу та виявлення нових подій майже в режимі онлайн (з невеликою затримкою). Змен-

шенням або збільшенням показника N (період часу, за який аналізуються джерела Twitter), а також порогового відсотка найбільш рейтингових джерел, з якого вони починають аналізуватися, можна збільшувати або зменшувати показники точності, повноти, та F1-міри.

Список літератури:

1. Jung H., Stent A. ATT1: Temporal annotation using big windows and rich syntactic and semantic features. 2013. P. 20–24.
2. Weiler A., Grossniklaus M., Scholl Marc H. Run-time and Task-based performance of event detection techniques for Twitter. 2015. P. 38–40.
3. Becker H., Naaman M., Gravano L. Beyond trending topics: real-world event identification on twitter. Proc. Intl. Conf on Weblogs and Social Media(ICWSM). 2011. P. 438–441.
4. Прищепя С. Технологія екстрагування нових подій за визначеною тематикою із соціальної мережі Twitter. Реєстрація, зберігання і оброб. даних. 2017. Т. 19. № 3. С. 67–72.
5. Додонов А., Ланде Д. Виявлення понять та їх взаємозв'язків у рамках технології контент-моніторингу. Реєстрація, зберігання і оброб. даних. 2006. Т. 8. № 4. С. 45–51.

ВЫЯВЛЕНИЕ НОВЫХ СОБЫТИЙ НА ОСНОВЕ РЕЙТИНГОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ TWITTER

В данной статье изучаются методы выявления новых событий в информационном потоке глобальной сети Интернет. Предлагается подход к выявлению новых событий с использованием метода рейтингования источников информации внутри социальной сети Twitter. Предложенный метод дает возможность уменьшить затраты на мониторинг источников и необходимые мощности для обработки и выявления новых событий. А перераспределение рейтинга источников увеличивает полноту и точность выборки с течением времени. Для традиционных методов экстрагирования новых событий характерны проблемы скорости выявления событий и необходимость в накоплении и обработке сверх-больших массивов данных. Данную проблему решает создание и мониторинг наиболее рейтинговых источников социальной сети с наибольшим количеством новых событий относительно всего количества сообщений.

Ключевые слова: *экстрагирование событий, рейтингование источников, обработка текста, Twitter, информационный поток.*

DETECTING NEW EVENTS BASED ON THE RATING OF TWITTER SOURCES

In this article, we study methods for identifying new events from the information flow of the global Internet. An approach his proposed for identifying new events using the method of rating information sources with in the social network Twitter. The proposed method makes it possible to reduce the cost of monitoring sources and the necessary capacity to hand lean identify new events. A redistribution of the source rating once in the N-time, in creases the fullness and accuracy of the sample overtime. Traditional methods of extracting new events have the problem of the speed of event detection and the need for accumulation and processing of super-large datasets. This problem is solved by the creation and monitoring of themstrated sources of the social network.

Key words: *event extraction, source rating, text processing, Twitter, information flow.*

Samoilenko D.M.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

Sivko O.E.

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

HTTP DATA CIPHERING ALGORITHM

Purpose. Modern trends of IT systems evolution are to fill all spheres of human life. Most of all, for connection and data transfer the HTTP protocol is used. Due to its oldness many modern problems find no simple solutions. It is possible to encounter such problems as insecurity of data transferring via POST method or troubles with sharing private data by e-mail. But it is possible to secure private data by using algorithm which is described. Methods. We used Shannon's principle by adding crypto "salt" to the source text and extending it to given length to prevent spoofing and substitution, DES-like algorithm (permutation – password applying – permutation) and feedback by ciphered text to give extra strength to the algorithm. Results. As the result an algorithm of HTTP data securing was described. PHP code fragments of functions which implement it were listed. Effectiveness of the method was proved by an algorithm tests. Discussion. Algorithm proposed in the work allows to securely transfer data via HTTP protocol. It suits for small pieces of data like passwords or personal data and should not be used to encrypt large sequences of text or other type of data.

Key words: HTTP protocol, secure information, data protection, program code, cryptography.

Introduction. Modern trends of IT systems evolution are to fill all spheres of human life. In some cases it dealt with interconnection of formally unrelated systems working with different encodings, protocols, algorithms, languages etc. Most of all, for connection and data transfer the HTTP protocol is used. Due to its oldness many modern problems find no simple solutions.

For example, the task is to send personal email proposition which should include some private data in a link inside the message. But email protocols allow no invisible POST data transfer. Only way is to include private data in GET parameters visible for all behind one's back. Another problem arises when user sends their private data via some e-form. Although POST method is available, data transferred could be spied with help of traffic sniffers.

Idea of the HTTP secure transferring algorithm. Such tasks as sending personal data by e-mails or acquiring passwords by Internet communication should be realized with data encryption. But there is another problem: symbols on client and server may have different encoding whereas encryption applies for symbol codes not for the symbols directly. Moreover, for a small data units like password or birth-date there are no necessity for complex ciphering. Follow Shannon's principles of secure communica-

tion we could easy use crypto "salt" with entropy not less than whole data. When entropy added equal or greater than data entropy we formally take a case similar to one-time pad ciphering that cannot be cracked.

This article is for develop a ciphering algorithm which operates with symbols directly (not with its codes) designed for small data units transfer via HTTP protocol especially for GET method.

In work [1] an idea for such ciphering was proposed. The base of the idea is involute transform in symbol set (alphabet). Mean c to be a ciphered symbol, t and p – text and password symbols respectively, the transform looks like

$$c = \overline{t + p}, \quad (1)$$

where overline means additive inverse in alphabet. In aforementioned work involute property of transform was proved, so deciphering use the same procedure (add password symbol and inverse):

$$t = \overline{c + p}. \quad (2)$$

Program code realization. Practical realization of data ciphering will be shown using PHP language as a popular tool for HTTP communications. For transform realization, it is necessary to declare an alphabet as a set of symbols allowed in channel

\$alph = "abcdefgh...ABCDEFGH...0123...".

Usage of predefined symbols instead of built-in symbols tables, first, prevents discordance in different tables (on client and server side) and, second, allows additional control for unauthorized intervention in data.

Alphabet length will play role of calculation modulo
 $\$mod = strlen(\$alph)$.

For calculation acceleration, we will use predefined array of symbols numbers

$\$sno = array ("a" => 0, "b" => 1, \dots)$.

Symbols numbers could be calculated at runtime calling corresponding function, but described way has advantage for expended time.

If $\$c$ variable used for cipher symbol, $\$t$ – for text (initial data) symbol, $\$p$ –for password and $\$d$ – for decrypted symbol, (1) and (2) transforms could be programmed as.

$\$c = \$alph[\$mod-(\$sno[\$t] + \$sno[\$p])\% \$mod-1]$;

$\$d = \$alph[\$mod-(\$sno[\$c] + \$sno[\$p])\% \$mod-1]$.

For better invulnerability to impersonate, substitution and spoofing attack [3–4] the entropy of joint set MES (message – encryption – source) should be minimal. Therefore, ciphered blocks should be aligned – they must have the same size despite to different size of initial blocks. However, the data about initial block length should be preserved in cipher block.

Combine statements about additional entropy, crypto “salt” and block alignment we can describe the first stage of data ciphering:

Length of initial data block calculates and includes in it.

Random symbols adds to initial block to extend it for predetermined size.

We propose to preserve initial data block length by including at the begin of data the symbol which order in alphabet is equal to the length. Since symbol set includes

at least small, capital letters and digits its length quite enough for blocks with 70 symbols. As a rule, protected HTTP data blocks has significantly shorter length:

$\$text = "secure_text"; //HTTP data example;$

$\$len = strlen (\$text); //length of data;$

$\$text = \$alph [\$len].\$text; //length as a symbol in first position.$

Next, we propose a schema, similar (in idea) to DES algorithm: A) initial permutation; B) password appliance; C) final permutation. Permutation tables from DES standard could be used for 64-symbol blocks. For smaller blocks and for simpler demonstration we will use 32-symbol version built on DES ideas [4].

$\$IP = array (30, 26, 22, \dots 11, 7, 3);$

$\$IP1 = array (24, 8, 32, \dots 1, 25, 9);$

$\$perm = "";$

For ($\$i = 0; \$i < 32; \$i ++$);

$\$perm. = \$text[\$IP[\$i]-1]; // -1 since origin 0.$

Password appliance is produced in cipher-feedback mode. Since data block was expanded with “salt” there is not necessary to provide other non-linear transformations. This statement will be proved by examples analysis further. Cipher-feedback means that after password symbols finishing, previous symbols of cipher are used as password:

$\$pass = "password";$

$\$plen = strlen (\$pass);$

$\$ciph = "";$

for ($\$i = 0; \$i < 32; \$i ++$){

$\$t = \$perm [\$i];$

$\$p = (\$i < \$plen)?\$pass [\$i]: \$ciph [\$i-\$plen]$

//password or cipher

$\$ciph. = \$alph [\$mod-(\$sno [\$t] + \$sno [\$p])\% \$mod-1];$

}

Finally, the inverse IP^{-1} permutation applied to cipher text. Codes are the same to IP applica-

Table 1

Algorithm tests

text: <code>_secure_text</code>	password: <code>p</code>
Y H b 9 b F S 0 8 m c 9 e G 5 R O p T g f x 5 R 1 z V 9 _ r 3 _	
6 O p r 5 y E Q e t q r 8 z R x W j g r m H H E v b b y J R T m	
j t q T Q T D o t 0 r T T 4 Q 7 _ d b b W D X N 9 n 9 s 8 G 1 A	
S D v g h J y 1 2 i w g k K L I I e 0 a z Q Z G h 7 4 k 2 R a w	
m b f Y N _ O j w S g Y Q a 1 2 c 6 e 2 I R O 4 c q f 0 Z x F 8	

tion shown above, only name of array changes for \$perm1.

Algorithm results test. For ciphering algorithm testing, first, produce many ciphers for the same initial text and password. Second, repeat the test for the data consists of the same symbols.

Tabulations in Tab.1 allows better visual analysis of cipher outcome: there are no vertical lines with the same symbol (analogue for fixed bits). Therefore, in practice algorithm shows appropriate results.

Second test (with similar symbol text) shows appropriate results too. There are no enlarged probability for basic symbol or it prevailing appearance in cipher-text.

Due to involute transform and mutually inverse permutations, deciphering algorithm is the same to ciphering, but cipher text should be used instead of initial data. In deciphered result first symbol order (in alphabet) tells us how much symbols are informative.

Conclusions. Adaptation of bitwise methods, crypto- and stegoalgorithms, and information theory theorems for symbol operations allows creating an algorithm for small-block data ciphering typical in network protocol like HTTP. Algorithm use no symbol code tables and shows no fixed symbols in subsequent operations. It could be useful in protected data transfer via open network.

References:

1. Самойленко Д.М. Комплексна система захисту інформаційного ресурсу. Інформаційна безпека. 2013. С. 147–151.
2. Самойленко Д.М. Web-орієнтована система шифрування URI параметрів. Проблеми кібербезпеки інформаційних та телекомунікаційних систем. 2017. С. 196–198.
3. Pei D.Y. Authentication Schemes. Singapore: Institute for Mathematical Sciences. 2001. 36 p. URL: www.ims.nus.edu.sg/Programs/coding/files/dypei.ps (дата звернення: 28.03.2018)
4. Simmons G.J. Authentication Theory / Coding Theory. Advances in Cryptology. 1985. P. 411–431.
5. DES supplementary material // Wikipedia, the free encyclopedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/DES_supplementary_material (дата звернення: 28.03.2018)
6. FIPS Publication 46–3, Data Encryption Standard (DES). URL: <https://csrc.nist.gov/csrc/media/publications/fips/46/3/archive/1999-10-25/documents/fips46-3.pdf> (дата звернення: 28.03.2018)

АЛГОРИТМ ШИФРУВАННЯ ДАНИХ НТТР-ПРОТОКОЛУ

Мета. Сучасні течії еволюції ІТ-систем сприяють заповненню всіх сфер людського життя. Для встановлення з'єднань та передачі даних найчастіше використовується протокол НТТР. Через його застарілість багато нових проблем не знаходять простих рішень. Можна стикнутися із проблемами на зразок незахищеності передачі даних за допомогою POST або із проблемами під час передачі захищених даних електронною поштою. Але є можливість захистити приватні дані, якщо використати описаний алгоритм. *Методи.* Використано принцип Шенона шляхом додавання криптографічної «солі» до початкового тексту та розширення його для запобігання перестановкам і спуфінгу; DES-подібний алгоритм (перестановка – використання пароля – перестановка) та зворотний зв'язок за вже зашифрованим текстом із метою надання додаткової стійкості алгоритму. *Результати.* Описано прикладний алгоритм шифрування даних, що передаються за протоколом НТТР. Наведено фрагменти коду функцій мовою РНР. Ефективність методики доведено шляхом тесту алгоритму. *Дискусія.* Запропонований у роботі алгоритм дозволяє гарантувати безпечну передачу даних за допомогою протоколу НТТР. Він підходить для роботи з невеликими об'ємами даних, як-от паролі, персональні дані, та не може бути використаний для шифрування великих текстових послідовностей або уже інших типів даних.

Ключові слова: протокол НТТР, захищена інформація, захист даних, програмний код, криптографія.

АЛГОРИТМ ШИФРОВАНИЯ ДАННЫХ НТТР-ПРОТОКОЛА

Цель. Современные течения эволюции ИТ-систем способствуют заполнению всех сфер человеческой жизни. Для установления соединений и передачи данных чаще всего используется протокол НТТР. Вследствие его устарелости многие новые проблемы не находят простых решений. Можно столкнуться с проблемами вроде незащищенности передачи данных с помощью POST или со сложностями при передаче защищенных данных по электронной почте. Но есть возможность защитить частные данные, используя описанный алгоритм. *Методы.* Использован принцип Шеннона путем добавления криптографической «соли» к исходному тексту и расширение его для предотвращения перестановок и спуфинга; DES-образный алгоритм (перестановка – применение пароля – перестановка) и обратная связь по уже зашифрованному тексту для придания алгоритму дополнительной устойчивости. *Результаты.* Описан прикладной алгоритм шифрования данных, передаваемых по протоколу НТТР. Приведены фрагменты кода функций на языке РНР. Эффективность методики доказана путем теста алгоритма. *Дискуссия.* Предложенный в работе алгоритм позволяет обеспечить безопасную передачу данных по протоколу НТТР. Он подходит для работы с небольшими объемами данных, например, паролями, персональными данными, и не может быть использован для шифрования больших текстовых последовательностей или других типов данных.

Ключевые слова: протокол НТТР, защищенная информация, защита данных, программный код, криптография.

Відомості про авторів

- Андрощук А.В.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Андрущенко В.Б.** – аспірант Інституту проблем реєстрації інформації НАН України;
- Бабкін О.В.** – керівник відділу хмарних обчислень, Bell Integrator (Росія, Москва);
- Беглов К.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;
- Безвесільна О.М.** – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Біряк В.В.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Бланар П.Г.** – магістрант Одеського національного політехнічного університету;
- Бойко О.В.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Борейко М.Г.** – аспірант відділу пристроїв, систем та технологій безконтактної діагностики Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова Національної академії наук України;
- Будник М.М.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник відділу пристроїв, систем та технологій безконтактної діагностики Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова Національної академії наук України;
- Бундюк А.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обліку, аналізу та аудиту Одеського національного політехнічного університету;
- Буслов П.В.** – аспірант Харківського національного університету радіоелектроніки;
- Ванін В.В.** – доктор технічних наук, професор, науковий керівник кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки, декан фізико-математичного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Варенко А.М.** – інженер Навчально-технічного центру мережевих технологій Національного університету «Львівська політехніка»;
- Вовк І.В.** – студент Одеського національного політехнічного університету;
- Восводін Є.В.** – аспірант кафедри інформаційних технологій Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького;
- Герасименко Ю.Ю.** – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Гресь О.В.** – асистент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;
- Дос Є.В.** – провідний архітектор, DevOps EPAM (Білорусь, Мінськ);
- Дуба І.Е.** – студент Одеського національного політехнічного університету;
- Думич С.С.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»;
- Єрмаков І.О.** – магістр Одеського національного політехнічного університету;
- Зуєв Д.О.** – незалежний консультант, міжнародний IT-експерт (США, Нью Джерсі);
- Івіцький І.І.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Кисельова Н.І.** – магістр кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;
- Коваленко Д.М.** – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Колосов О.Є.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Колосова О.П.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри нарисної геометрії, інженерної та комп'ютерної графіки фізико-математичного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Комлева Н.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри системного програмного забезпечення Одеського національного політехнічного університету;

- Конущбаєва Т.В.** – студентка Одеського національного політехнічного університету;
- Коротенко Г.М.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри геоінформаційних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»;
- Коротенко Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»;
- Котречко О.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри надійності техніки Національного університету біоресурсів і природокористування України;
- Кравчук Є.С.** – студент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Красько О.В.** – кандидат технічних наук, інженер кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»;
- Кропачов А.В.** – керівник департаменту рішень автоматизації, Bell Integrator USA (США, Північна Кароліна);
- Кулаласв А.В.** – кандидат технічних наук, генеральний директор Інтернаціональної технічної економічної компанії «ІнтерТЕК»;
- Кулаласв В.В.** – доктор технічних наук, генеральний конструктор, науковий консультант Інтернаціональної технічної економічної компанії «ІнтерТЕК»;
- Кушнір М.С.** – аспірант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Левкін Д.А.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри вищої математики Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка;
- Ложечников В.Ф.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем автоматизації Одеського національного політехнічного університету;
- Макаренко А.В.** – завідувач відділення радіонуклідної діагностики Київської міської клінічної лікарні № 14;
- Максимюк Т.А.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка»;
- Мартиш Є.В.** – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри медичної радіофізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка;
- Ніколов М.О.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри електронної інженерії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Новогорецький С.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;
- Олещенко Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Панчук Л.В.** – аспірант кафедри автоматизації та енергоменеджменту Національного авіаційного університету;
- Погребний Я.С.** – магістр кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Одеського національного політехнічного університету;
- Погромська Г.С.** – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та прикладної математики Миколаївського національного університету імені В.О. Сухомлинського;
- Подимака В.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри суднових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;
- Прищепа С.В.** – аспірант Інституту проблем реєстрації інформації НАН України;
- Прудніков А.О.** – аспірант кафедри суднових електроенергетичних систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;
- Розорінов Г.М.** – доктор технічних наук, професор кафедри звукотехніки та реєстрації інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;
- Саміла А.П.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича;
- Самойленко Д.М.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

Семенов А.О. – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету;

Сергеев-Горчинський О.О. – кандидат технічних наук, старший викладач Інституту прикладного системного аналізу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Сівко О.Е. – студент Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова;

Сокольський О.Л. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Сторож Я.Б. – кандидат технічних наук, доцент, генеральний директор Державної установи «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці»;

Тарахтій О.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Одеського національного політехнічного університету;

Ткачук А.Г. – кандидат технічних наук Житомирського державного технологічного університету

Уліцька О.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем автоматизації Одеського національного політехнічного університету;

Фесенко О.Д. – ад'юнкт наукового організаційного відділу Військового інституту телекомунікації та інформатизації імені Героїв Крут;

Харь А.Т. – асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»;

Христордов О.В. – магістрант спеціальності комп'ютерні науки та інформаційні технології Миколаївського національного університету імені В.О. Сухомлинського;

Шевчук Д.О. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри автоматизації та енергоменеджменту Національного авіаційного університету;

Юрчишин В.Я. – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»;

Яремко О.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка».

НОТАТКИ

Науковий журнал

**ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО**

Серія: Технічні науки

Том 29 (68) № 3 2018

Частина 1

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *С. Калабухова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Івана Кудрі, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 16,4. Ум.-друк. арк. 23,48. Зам. № 0718/81

Підписано до друку 22.06.2018. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

73034, м. Херсон, вул. Паровозна, 46-а, офіс 105

Телефон +38 (0552) 39 95 80

E-mail: mailbox@helvetica.com.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 4392 від 20.08.2012 р.