

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХПІ»

УДК 681.5+519.7+519.8+004

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Системний аналіз, управління та інформаційні технології». – Х. : НТУ «ХПІ», 2011. – № 32. – 112 с.

Збірник наукових праць

**Тематичний випуск «Системний аналіз,
управління та інформаційні технології»**

32'2011

**Видання засноване Національним технічним університетом «ХПІ»
у 2001 році**

Держвидання

Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

У збірнику представлено теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, студентами, науковими співробітниками, спеціалістами різних організацій та підприємств.

Для науковців, викладачів, аспірантів, студентів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты научных исследований и разработок, которые выполнены преподавателями высшей школы, аспирантами, студентами, научными сотрудниками, специалистами различных организаций и предприятий.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов, студентов.

КООРДИНАЦІЙНА РАДА:

Голова

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.

Секретар

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц.

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.;
Є. І. Сокол, д-р техн. наук, проф.;
Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.;
Л. М. Бесов, д-р техн. наук, проф.;
А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;
Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.;
М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;
А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.;
В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;
В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.;
І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;
В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.;
Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;
П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.;
В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;
С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.;
В. М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.;
В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.;
Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;
В. С. Лупіков, д-р техн. наук, проф.;
О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.;
В. І. Николаєнко, канд. іст. наук, проф.;
П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.;

В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.;
М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.;
В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;
Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;
Ю. В. Тимофіїв, д-р техн. наук, проф.;
М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Відповідальний редактор

М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.

Заст. відповідального редактора

О. С. Куценко, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар

М. І. Безменов, канд. техн. наук, проф.

І. П. Гамаюн, д-р техн. наук, проф.;
В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.;
О. Є. Єфімов, д-р техн. наук, проф.;
І. В. Кононенко, д-р техн. наук, проф.;
В. П. Северин, д-р техн. наук, проф.;
Л. М. Любчик, д-р техн. наук, проф.;
Л. Г. Раскін, д-р техн. наук, проф.;
Н. В. Шаронова, д-р техн. наук, проф.;
М. О. Ястребенецький, д-р техн. наук, проф.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».
Кафедра «Системний аналіз і управління»,
тел. (057) 707-61-03, (057) 707-66-54.
E-mail: bezmenov@kpi.kharkov.ua

**Друкуються за рішенням Вченої ради НТУ «ХПІ»,
протокол № 8 від 02.09.2011 р.**

ISSN 2079-0023

© Національний технічний університет «ХПІ», 2011 р.

Харків НТУ «ХПІ» 2011

И. В. КОНОНЕНКО, д-р техн. наук, проф., зав. каф. стратегического управления НТУ «ХПИ»;
К. С. БУКРЕЕВА, аспирант НТУ «ХПИ»;
С. А. СУКАЧ, студент НТУ «ХПИ»

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МЕТОДОМ ОПТИМИЗАЦИИ ПОРТФЕЛЯ ПРОЕКТОВ ПРЕДПРИЯТИЯ ДЛЯ ПЛАНОВОГО ПЕРИОДА

Розглянуто питання стійкості рішень, отримуваних за допомогою методу оптимізації портфелів проектів підприємства для планового періоду. Перевірено стійкість сформованого оптимального портфеля проектів в галузі енергетики до зміни планових показників.

Рассмотрены вопросы устойчивости решений, получаемых с помощью метода оптимизации портфелей проектов предприятия для планового периода. Проверена устойчивость сформированного оптимального портфеля проектов в области энергетики к изменению плановых показателей.

The problems of stability of solutions using the method of project portfolio optimization for business planning period were considered. The stability of the generated optimal project portfolio in the energy to a change of plan indicators field was tested.

Введение. В 2009–2010 годах авторами И. В. Кононенко и К. С. Букреевой разработан метод оптимизации портфелей проектов предприятия для планового периода [1, 2]. Задача, решаемая методом, является многокритериальной задачей динамического программирования с булевыми переменными, аналитической целевой функцией и аналитическими и алгоритмическими ограничениями. Для ее решения предложен метод, относящийся к группе методов неявного перебора. С помощью программного обеспечения «Оптимизация портфелей», в котором реализован метод, решена задача формирования портфеля проектов в области энергетики и выбран оптимальный портфель [3]. Оптимизация портфелей проектов осуществляется с использованием прогнозной информации, которая заведомо неточна. Для принятия решений необходимо иметь представление о влиянии неточности прогнозной информации, а также изменения плановых показателей на результат оптимизации. Поскольку существует большой риск при малом отклонении условий решения задачи получить существенное отклонение в результатах, важным, с точки зрения практики, является анализ устойчивости полученных решений к изменению исходных данных.

Анализ существующих публикаций. При решении задач математического программирования в настоящее время, все большее значение приобретают вопросы устойчивости получаемых решений, а также постоптимальный анализ решаемых задач [4]. Методы проведения данных исследований для

непрерывных задач, в том числе для задач линейного и квадратического программирования подробно разработаны и освещены [5]. Для задач целочисленного программирования подобные исследования составляют новую, интенсивно развивающуюся, но еще не в полной мере сформировавшуюся область [4].

Постановка задачи. Целью работы является исследование устойчивости решения задачи формирования оптимального портфеля проектов в области энергетики, полученного при помощи метода оптимизации портфелей проектов предприятия для планового периода по отношению к изменению исходных данных.

Формирование портфелей проектов. С помощью программного пакета «Оптимизация портфелей» решалась задача оптимизации портфеля проектов в области энергетики для планового периода 2010–2013 годов. В качестве потенциальных участников портфеля рассматривались следующие восемь проектов (далее по тексту будут обозначаться порядковыми номерами):

1. Производство топливных гранул в Украине;
2. Технология утилизации отходов в биотопливу;
3. Технология использования модульных систем в малой ветроэнергетике;
4. Производство синтетического топлива из попутного нефтяного газа;
5. Создание солнечных модулей;
6. Производство водно-угольного топлива;
7. Производство моторного топлива из бурого угля;
8. Производство брикетного топлива.

Для каждого проекта введены данные по году начала, длительности, экспертные оценки для каждого из двадцати критериев, экономические данные по проектам [1]. Были определены ограничения по необходимым инвестициям, ожидаемому доходу и прибыли (табл. 1).

Таблица 1 – Значения ограничений для портфеля проектов, млн. грн.

ГОД	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Инвестиции	20	27	70	53	40	40	37	34,9	81	29	25
Доход	31	80	98	176	194	200	233	250	280	313	33
Прибыль	13	33	47	73	88	100	119	138	153	170	192

После введения данных по проектам в окно программы (рис.1), получен оптимальный вариант портфеля проектов для заданного планового периода, который состоит из следующих четырех проектов: производство топливных гранул в Украине, технология использования модульных систем в малой ветроэнергетике, создание солнечных модулей, производство брикетного топлива.

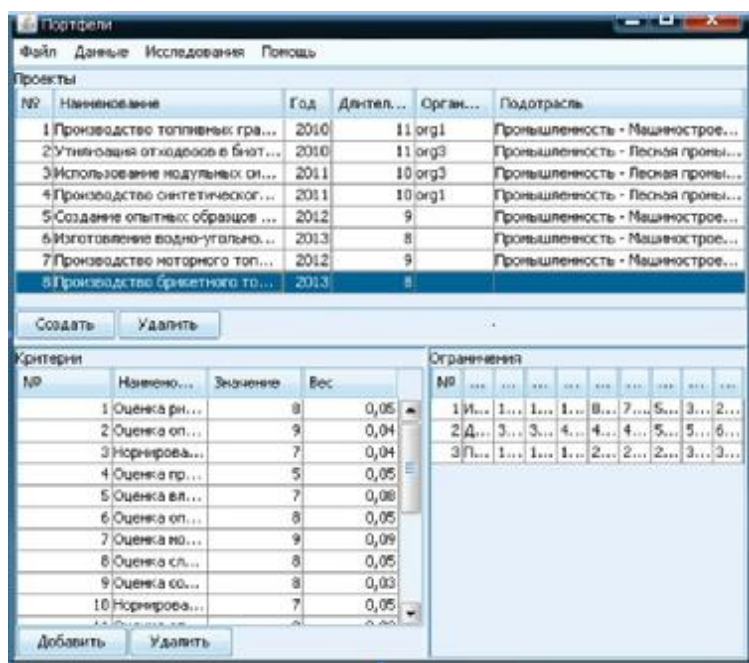


Рис. 1 – Окно ввода данных по проектам

Суммарные показатели полученного портфеля проектов по необходимым инвестиционным ресурсам, прибыли и доходу представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения ограничений для полученного оптимального портфеля, млн. грн.

ГОД	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Инвестиции	1,9	2,5	6,4	5,15	3,9	3,91	3,54	3,34	7,96	2,7	2,34
Доход	3,5	8,8	10,2	18,1	19,7	20,9	23,6	26	28,7	31,6	33,4
Прибыль	1,4	3,6	5	7,58	9,05	10,3	12,2	14,14	15,7	17,6	19,6

Проверка устойчивости решения. Для проверки устойчивости в приведенной задаче оптимизации портфеля проектов входными параметрами были приняты ограничения, которые определяются пользователями программы. В данной задаче рассматриваются ограничения по прибыли, по доходу и ограничение по необходимым инвестиционным ресурсам. Входные данные задаются через интерфейс программы, их можно варьировать. Для

нахождения возможных вариантов ограничений предлагается метод генерации случайных чисел с заданным интервалом распределения.

Для получения новых данных, по которым будет отслежена устойчивость системы на незначительные отклонения входных данных, необходимо сгенерировать новые значения ограничений. Применяя Microsoft Excel и функцию Генератор случайных чисел, был выбран равномерный закон распределения чисел в интервале. Равномерное распределение характеризуется верхним и нижним пределами. Переменные извлекаются из одной и той же вероятностью для всех значений интервала. Процедура генерации случайных величин используется для заполнения диапазона значений случайными числами, извлеченными из одного или нескольких распределений.

Для варьирования числовыми значениями ограничений, предлагается применить средства Microsoft Office, а именно – Microsoft Excel.

Для получения вариаций необходимо задать границы, в которых будут представлены новые данные. Для каждого ограничения в каждом году планового периода предельные значения были выбраны исходя из соображений инвесторов о возможностях, которые имеются и потребностях в доходе и прибыли, которые оптимальный вариант портфеля должен принести (табл. 3). В данном случае было принято отклонение по необходимым инвестициям в среднем плюс-минус 20,7% от первоначального значения ограничения по инвестициям за данный период. Отклонение по доходу составило плюс-минус 12,9% и отклонения по прибыли – плюс-минус 15%. Таким образом, было сгенерировано по 1000 значений для каждого рассматриваемого года по необходимым инвестициям, прибыли и доходам.

Таблица 3 – Границы интервалов варьирования значений ограничений, млн. грн.

ГОД	2010	2011	2012	2013
Необходимые инвестиции	13–27	20–34	63–77	46–60
Желаемый доход	21–41	70–90	88–108	166–186
Желаемая прибыль	8–18	28–38	42–52	68–78

После проведения данного анализа можно привести следующее распределение решений. Варианты полученных портфелей проектов при заданном диапазоне отклонений представлены на рис. 2.

Вариантом №1 был принят оптимальный портфель проектов, полученный при решении задачи с первоначальными данными (проекты 1, 3, 5, 8). В портфель вариант №2 вошли проекты 1, 3, 6, 7. Вариант №3 содержит проекты: 1,3,8. В вариант №4 вошли 1, 5, 8 проекты.



Рис. 2 – Распределение вариантов портфеля

Исходя из результатов диаграммы на рисунке 2, можно сделать вывод, что решение достаточно устойчиво, поскольку примерно в 46% исследований (457 раз) был получен первоначальный оптимальный вариант портфеля проектов. В 18% решений не было получено решение, что является приемлемым. Остальные три варианта портфелей были получены в диапазоне от 10 до 15% решений. Следует заметить, что проект №1 вошел во все варианты портфелей, то есть он является наиболее выгодным, проекты №3 и №8 вошли в три из четырех вариантов, что также говорит о целесообразности включения их в планируемый портфель.

Выводы. Было проведено исследование устойчивости решения задачи формирования оптимального портфеля проектов в области энергетики при помощи метода оптимизации портфелей проектов предприятия для планового периода. По результатам исследования можно сделать вывод, что данное решение является достаточно устойчивым к изменению исходных данных.

Список литературы: 1. Кононенко И. В. Метод формирования портфеля проектов / И. В. Кононенко, К. С. Букреева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 6/2(42) – 2009. – С. 15–19. 2. Кононенко И. В. Модель и метод оптимизации портфелей проектов предприятия для планового периода / И. В. Кононенко, К. С. Букреева // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 1/2(43) – 2010. – С. 9–11. 3. Кононенко И. В. Программе забезпечення з оптимізації портфеля проектів підприємства для планового періоду / І. В. Кононенко, К. С. Букреева // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. – Х. : Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», – 2010. – Вып. 48. – С. 253–263. 4. Сергиенко И. В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации / И. В. Сергиенко. – 2е изд., доп. и перераб. – К. : Наук думка – 1988. – 472 с. 5. Кононенко И. В. Компьютеризация управления развитием производственно-экономических систем. – Х. : НТУ «ХПИ» – 2006. – 239 с.

Надійшла до редколегії 23.05.2011

УДК 519.854.2

Ф. Г. ВАЩУК, д-р техн. наук, проф., ректор Закарпатського державного університету, м. Ужгород;

О. А. ПАВЛОВ, д-р техн. наук, проф., декан факультету інформатики та обчислювальної техніки НТУУ «КПІ», м. Київ;

О. Б. МІСЮРА, канд. техн. наук, ст. наук. співр. кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління НТУУ «КПІ», м. Київ;

О. О. МЕЛЬНИК, ст. викл. кафедри загальної інформатики та математичного моделювання Закарпатського державного університету, м. Ужгород

СКЛАДАННЯ РОЗКЛАДІВ ГРУП ДЛЯ ОДНОГО ПРИЛАДУ ІЗ НАЛАГОДЖЕННЯМИ ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМІЗАЦІЇ СУМАРНОГО ВИПЕРЕДЖЕННЯ І ЗАПІЗНЕННЯ

У даній статті розглядається задача складання розкладів із часами налагоджень сімейств (груп), де завдання в кожному сімействі виконуються разом. Налагодження, незалежне від послідовності, потрібне для виконання завдання з іншого сімейства. Ціль полягає в мінімізації сумарного випередження й запізнювання. Запропоновані евристичні алгоритми, дослідним шляхом вони оцінені в плані їх ефективності. Результати показують, що вони генерують розв'язки, достатньо близькі до оптимальних.

В данной статье рассматривается задача составления расписаний с временами наладок семейств (групп), где задания в каждом семействе выполняются вместе. Наладка, независимая от последовательности, требуется для выполнения задания из другого семейства. Цель состоит в минимизации суммарного опережения и запаздывания. Предложены эвристические алгоритмы, опытным путем они оценены в плане их эффективности. Результаты показывают, что они генерируют решения, достаточно близкие к оптимальным.

In this article the problem of scheduling with setup times of families (groups) is considered where the tasks in each family are performed together. The setup is sequence-independent and required for the task from another family. The goal is to minimize the total earliness and tardiness. Proposed heuristic algorithms are empirically evaluated in terms of their effectiveness. The results show that they generate solutions that are sufficiently close to optimal.

Вступ. Задачі складання розкладів груп, де всі роботи одного і того самого сімейства повинні бути призначені разом, привернули увагу багаточисельних дослідників через часте виникнення в реальному житті. Багато виготовлювачів реалізували концепцію групової технології (ГТ), щоб зменшити витрати на налагодження, час підготовки, витрати на складування незавершених робіт і вартість вантажно-розвантажувальних робіт. Групова технологія полягає в розділенні усієї множини робіт у декілька підмножин, названих сімействами, де сімейство – підмножина робіт, які мають схожі вимоги з погляду обладнання й налагоджень [1]. Так як різні сімейства робіт вимагають різного набору інструментів, налагодження часто необхідне, коли повинна бути ви-

конана робота з іншого сімейства. Так як роботи призначаються на сімейства, засновані на вимогах до набору інструментів і налагодженню, звичайно є незначне або невелике налагодження при переході від однієї деталі до іншої в межах одного й того ж сімейства. Оскільки є велике переналагодження між сімействами, то існує перевага в обробці деталей, що належать тому самому сімейству як одна група. Це – ключова відмінність між задачею складання розкладів груп і традиційною задачею складання розкладів. Щоб розв'язати цю проблему більших великих налагоджень між сімействами, повинні бути знайдені оптимальна послідовність робіт у межах кожного сімейства, а також оптимальна послідовність сімейств, щоб оптимізувати заданий критерій ефективності.

У теперешній час значна увага в літературі приділяється складанню розкладів відносно директивних строків. Одна з причин цього явища – зростаючий тиск конкуренції на міжнародних ринках: фірми повинні запропонувати велику розмаїтість різних та індивідуальних виробів, у той час як клієнти очікують, що замовлені товари будуть поставлені вчасно. Принцип виробництва «точно в строк» установлює, що необхідна кількість товарів повинна бути вироблена або поставлена точно в заданий час. Виконання роботи з випередженням приводить до витрат на складування, у той час як запізнення робіт – до штрафів і, в остаточному підсумку, втраті доброзичливості клієнтів і репутації фірми.

Огляди недавніх досліджень у розв'язанні задач складання розкладів з налагодженнями сімейств Монма і Поттсом (1989), Поттсом і Ван Вассенгомом (1992), Поттсом і Ковальовим (2000) і Вебстером і Бейкером (1995) показують, що більша частина досліджень в задачах складання розкладів груп присвячена сумарному (зваженому) часу проходження (знаходження в потоці) і максимальному запізнюванню. Наприклад, Чень, Гордон і Ковальов (1996) представили поліноміальний алгоритм для критерію мінімізації максимальної вартості розкладу за умови мінімуму зваженого сумарного часу проходження. Проте, наскільки нам відомо, жодна з опублікованих робіт не присвячена задачі складання розкладів груп за критерієм мінімізації сумарного випередження і запізнювання на одному приладі (МВЗ). Тому в даній статті розглядається складання розкладів груп з часами налагодження сімейств, не залежними від послідовності, та пропонуються евристичні алгоритми для знаходження розкладів з мінімальним сумарним випередженням і запізненням, в основу яких покладено новий підхід до розв'язання задачі МВЗ, викладений у [2, 3]. У даній статті ми розширюємо цей підхід для більш загальної та більш практичної задачі, що з'являється особливо у виробничих задачах складання розкладів – задачі із часами налагодження. В статті представлено алгоритми локального пошуку, що широко використовуються як практичний підхід для розв'язання задач комбінаторної оптимізації.

Постановка задачі. Задача складання розкладів груп з часами налагодження сімейств на одному приладі може бути сформульована таким чином:

задано число сімейств, позначене f , і кількість завдань в кожному сімействі, представлена числом n_i для сімейства $i=1, \mathbf{K}, f$, які повинні бути виконані без переривання на одному приладі. Тривалість виконання і директивний строк j -го завдання з сімейства g_i визначені як p_{ij} і d_{ij} відповідно. Крім того, якщо завдання слідує за попереднім завданням з того ж сімейства, то між ними немає часу налагодження; інакше потрібен час налагодження сімейства S_{g_i} перед наступним процесом виконання. Звернемо увагу, що S_{g_i} не залежить від позиції, займаної сімейством. Тобто, час налагодження сімейства залежить тільки від наступного сімейства. До того ж передбачається, що є налагодження до виконання першої роботи в будь-якій послідовності. Всі завдання доступні в момент часу нуль, простої приладу допускаються, а переривання завдань заборонено. Прилад виконує не більш ніж одне завдання одночасно, і не може виконувати ніяке завдання, поки виконується наладка. Всі завдання в кожному сімействі мають бути призначені разом. Іншими словами, у будь-якій допустимій послідовності повинні бути тільки f налагодок. Загальна кількість завдань $n = n_1 + n_2 + \mathbf{K} + n_f$. Для будь-якого заданого розкладу випередження та запізнення завдання j можуть бути визначені виразами (2) і (3). Ціль полягає в тому, щоб знайти розклад, який мінімізує сумарне випередження і запізнення всіх завдань:

$$\sum_{j=1}^n (E_j + T_j), \quad (1)$$

де випередження і запізнення визначаються як, відповідно,

$$E_j = \max(0, d_j - C_j) = (d_j - C_j)^+, \quad (2)$$

$$T_j = \max(0, C_j - d_j) = (C_j - d_j)^+. \quad (3)$$

Сформульована задача узагальнює задачу МВЗ і відноситься до класу NP -повних.

Пропонуються два алгоритму розв'язання задачі: для випадку, коли простої приладу допускаються (алгоритм А1) і для випадку, коли вони заборонені (алгоритм А2).

Умовні позначення:

$t_{g_i}^{H3}$ – ефективний момент початку виконання сімейства g_i , що визначається алгоритмом розв'язання задачі МВЗ [2, 3];

C_{g_i} – момент закінчення виконання сімейства g_i ;

T_{g_i} – сумарна тривалість виконання завдань сімейства g_i із налагодженням:

$$T_{g_i} = S_{g_i} + \sum_{j \in g_i} p_{ij};$$

U – множина всіх сімейств $\{g_k | k=1, \mathbf{K}, f\}$;

V – множина всіх сімейств, призначених на виконання;

Алгоритми A1 і A2 засновано на використанні алгоритму розв'язання задачі MB3 [2, 3]. У результаті в межах кожного сімейства g_i будується послідовність виконання завдань, оптимальна за вказаним функціоналом.

Алгоритм розв'язання задачі MB3. Алгоритм базується на наступних твердженнях.

Нехай j і j_i позначають номер завдання відповідно до індексації, заданої функціоналом; $j_{[g]}$ – номер завдання, що стоїть в деякій розглянутій послідовності на позиції g . Позначимо $r_j = \max(0, d_j - C_j)$ – резерв завдання j . Очевидно, $r_j = E_j$.

Справедливі наступні леми [4]:

Лема 1. Послідовність, відсортована за неспаданням значень тривалості виконання, яка не має робіт, що випереджають, є оптимальною за критерієм MB3.

Лема 2. Послідовність, відсортована за незростанням значень тривалості виконання, яка не має робіт, що запізнюються, є оптимальною за критерієм MB3.

Алгоритм складається з трьох блоків. У *Блоці 1* розв'язується задача мінімізації сумарного запізнення при виконанні незалежних завдань одним приладом (МСЗ) [3]. Алгоритм розв'язання задачі МСЗ побудований на перестановках і полягає в оптимальному використанні завданнями, що запізнюються, резервів завдань, що не запізнюються. Використовуються наступні типи перестановок:

1) Вільні перестановки.

Визначення 1. Вільною перестановкою завдання називається перестановка його на позицію з максимальним номером, на якій воно залишається не запізненим, при умові, що на інтервалі перестановки є запізнені завдання.

2) Перестановки (EFSR – extraction and forward-shifted reinsertion – извлечение и повторная вставка со сдвигом вперед). Перестановкою називається процедура переносу завдання $j_{[g]}$ на позицію k ($k > g$) і, одночасно, завдань, що займають позиції $g+1, g+2, \mathbf{K}, k-1, k$, на позиції $g, g+1, \mathbf{K}, k-2, k-1$, відповідно.

3) Вбудовування (EBSR – extraction and backward-shifted reinsertion – извлечение и повторная вставка со сдвигом назад). Вбудовуванням називається процедура переносу завдання $j_{[g]}$ на позицію p ($g > p$) і, одночасно, завдань $p, p+1, \mathbf{K}, g-2, g-1$ на позиції $p+1, p+2, \mathbf{K}, g-1, g$, відповідно.

У результаті розв'язання задачі МСЗ у Блоці 1 реалізується зменшення сумарного запізнення за рахунок зменшення сумарного випередження. Якщо в цій послідовності резерви відсутні, то ця послідовність оптимальна за критерієм MB3.

У *Блоці 2* здійснюється зменшення значення сумарного випередження і запізнення за допомогою послідовного збільшення моментів початку виконання завдань.

Позначимо $r_{\min} = \min\{r_j\}$; N_r – число завдань з резервами ($r_j > 0$); N_s – число завдань, що запізнюються (в їх число включаються завдання з нульовим резервом). Встановлюємо $t_{g_i}^{ns} = 0$.

Твердження 1 [5] (використання резервів завдань, що випереджають). Якщо в послідовності σ виконується $N_r > N_s$, то при збільшенні початку виконання завдань на величину, рівну r_{\min} , значення функціонала випередження/запізнення зменшується на величину $(N_r - N_s)r_{\min}$.

Розглядається послідовність, що отримана в результаті розв'язання задачі МСЗ [3]. Якщо в отриманій послідовності резерви відсутні, то ця послідовність оптимальна за критерієм MB3. На кожній ітерації за умови $N_r \geq N_s$ збільшуються моменти початку виконання завдань у поточній послідовності $t_{g_i}^{ns}$ на r_{\min} . Такі процедури виконуються, поки у послідовності, отриманій після оптимізації за критерієм МСЗ, не виконається умова $N_r < N_s$. Отриману послідовність позначасмо σ^R і перевіряємо умови твердження 2.

Твердження 2 [5] (ознака оптимальності послідовності σ^R). Якщо в послідовності σ^R резерви відсутні, то вона оптимальна за критерієм MB3.

У *Блоці 3* здійснюється оптимізація послідовності σ^R . Виконуються $n_i - 1$ ітерацій, на кожній ітерації визначається найбільш ефективна позиція вбудовування чергового завдання на більш ранню позицію, якщо це призводить до зменшення значення функціоналу. Нехай вже виконана $k-1$ ітерація. Для завдання $j_{[k]}$ перевіряємо кожну позицію $p = \overline{1, k-1}$ і шукаємо позицію p , на якій значення функціоналу зменшується на максимальну величину:

$$\sum_{i=p}^k |d_{j_{[i]}} - C_{j_{[i]}}| - \left| (d_{j_{[k]}} - C_{j_{[k]}}) - \sum_{i=p}^{k-1} l_{j_{[i]}} \right| - \sum_{i=p}^{k-1} |d_{j_{[i]}} - C_{j_{[i]}} + l_{j_{[k]}}| \rightarrow \max \quad (4)$$

Для цього встановлюємо завдання $j_{[k]}$ на позицію p , виконуємо вільні перестановки (див. визначення 1), визначаємо зменшення функціоналу за формулою (4). Встановлюємо завдання $j_{[k]}$ на ту позицію p , на якій досяга-

ється максимальне зменшення значення функціоналу. $k = k + 1$. Якщо $k > n$, кінець роботи алгоритму. Інакше переходимо до наступної ітерації.

Алгоритм А1. Алгоритм складається з трьох етапів.

Етап 1. Визначення найбільш ефективних моментів початку виконання сімейств $t_{g_i}^{H0}, i=1, \mathbf{K}, f$, при яких досягаються близькі до оптимальних значення функціоналу для кожного сімейства. На цьому етапі використовується алгоритм розв'язання задачі МВЗ [2, 3], наведений вище.

Етап 2. Побудова послідовності сімейств σ^0 . Сімейства упорядковуються за незростанням значень їх пріоритетів і призначаються на виконання в цій послідовності таким чином, щоб початок виконання $t_{g_i}^H, i=1, \mathbf{K}, f$, був як можливо ближче до моментів $t_{g_i}^{H0}, i=1, \mathbf{K}, f$, отриманих на попередньому етапі. Таке призначення дозволить отримати ефективні близькі до оптимального розв'язки за критерієм МВЗ.

Етап 3. Зменшення значення функціоналу за допомогою послідовного виконання попарних перестановок сусідніх сімейств.

Розглянемо виконання кожного етапу більш детально.

Етап 1. На цьому етапі для кожного сімейства g_i за допомогою реалізації алгоритму розв'язання задачі МВЗ із урахуванням тривалості налагодження будується послідовність виконання робіт в межах сімейства g_i , близька до оптимальної за значенням функціоналу, що розглядається, і визначається найбільш ефективний момент початку виконання сімейства $t_{g_i}^{H0}$.

Етап 2. Пропонований алгоритм включає f ітерацій по числу сімейств, які необхідно призначити на виконання. На кожній ітерації визначається інтервал виконання чергового сімейства з послідовності σ^{yn} .

Упорядковуємо сімейства за неспаданням значень їх тривалостей T_{g_i} (послідовність σ^{yn}). Побудова послідовності σ^0 , що визначає черговість призначення сімейств на виконання, починаємо з сімейства, що має мінімальну тривалість. Визначаємо інтервал його вставки: $t_{g_1}^H = t_{g_1}^{H0}; C_{g_1} = t_{g_1}^H + T_{g_1}$. Переходимо до наступного сімейства завдань послідовності σ^{yn} .

Нехай вже виконані k ітерацій, в результаті яких визначені позиції вставки в послідовність $g_1, g_2, \mathbf{K}, g_k$. Визначаємо інтервал вставки сімейства g_{k+1} : $t_{g_{k+1}}^H = t_{g_{k+1}}^{H0}; C_{g_{k+1}} = t_{g_{k+1}}^H + T_{g_{k+1}}$. Якщо цей інтервал вільний, то сімейство g_{k+1} займе в послідовності σ^0 вказані позиції. Інакше шукаємо для вставки сімейства g_{k+1} новий інтервал, на якому $t_{g_{k+1}}^H$ максимально наближений до $t_{g_{k+1}}^{H0}$.

У процесі побудови послідовності σ^0 можливі ситуації, коли сімейство g_{k+1} перетинається з іншим сімейством g_l за виконанням. Розглянемо такі випадки:

1) $t_{g_l}^H < t_{g_{k+1}}^H < C_{g_l}$. У цьому випадку сімейство g_{k+1} зсувається на більш пізні позиції: $t_{g_{k+1}}^H = C_{g_l}; C_{g_{k+1}} = t_{g_{k+1}}^H + T_{g_{k+1}}$. Якщо, в свою чергу, існує сімейство g_r , для якого $C_{g_{k+1}} > t_{g_r}^H$, сімейство g_r переміщується на більш ранні позиції після g_l , а сімейство g_{k+1} вставляється після нього: $t_{g_r}^H = C_{g_l}; t_{g_{k+1}}^H = C_{g_r} = t_{g_r}^H + T_{g_r}; C_{g_{k+1}} = t_{g_{k+1}}^H + T_{g_{k+1}}$.

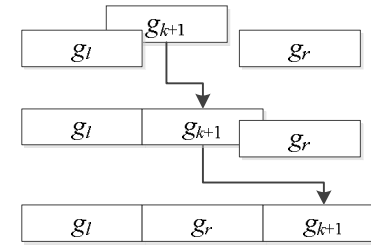


Рисунок 1 – Випадок перетину g_{k+1} з кінцем g_l

2) $t_{g_l}^H < C_{g_{k+1}} < C_{g_l}$. У цьому випадку сімейство g_{k+1} зсувається на більш ранні позиції: $C_{g_{k+1}} = t_{g_l}^H; t_{g_{k+1}}^H = C_{g_{k+1}} - T_{g_{k+1}}$. Якщо виявиться, що в результаті вставки сімейство g_{k+1} перетинається з сімейством g_r , і виконується $C_{g_r} > t_{g_{k+1}}^H$, то сімейство g_r переміщується на більш пізні позиції, а сімейство g_{k+1} вставляється перед ним: $C_{g_r} = t_{g_l}^H; t_{g_r}^H = C_{g_r} - T_{g_r}; C_{g_{k+1}} = t_{g_r}^H; t_{g_{k+1}}^H = C_{g_{k+1}} - T_{g_{k+1}}$.

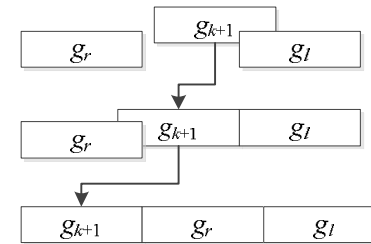


Рисунок 2 – Випадок перетину g_{k+1} з початком g_l

Така процедура виконується до тих пір, поки сімейство g_{k+1} не буде вставлено в послідовність σ^0 . Якщо $t_{g_{k+1}}^H \neq t_{g_{k+1}}^{H^0}$, по алгоритму розв'язання задачі МВЗ перевпорядковуємо завдання в межах сімейства.

Переходимо до наступного сімейства завдань послідовності σ^{yn} . Якщо вставлені всі сімейства, послідовність σ^0 побудовано. Якщо $t_{g_i}^H = t_{g_i}^{H^0}$, $i = 1, \mathbf{K}, f$, то послідовність σ^0 оптимальна.

Етап 3. Полягає в послідовному виконанні попарних перестановок сусідніх сімейств. Перестановка виконується, якщо вона призводить до зменшення значення функціоналу.

Кінець алгоритму А1.

Алгоритм А2. Алгоритм А2 використовується у випадках, коли простої приладу заборонені.

Етап 1. Побудова послідовності σ^0 . Побудова послідовності сімейств завдань здійснюється з визначення сімейства, яке буде займати останню позицію. З цією метою для кожного сімейства g_k , застосовуючи алгоритм розв'язання задачі МВЗ із урахуванням тривалості налагодження, визначаємо значення функціоналу задачі МВЗ для випадку, якщо це сімейство займе останню позицію в послідовності σ^0 . Момент початку виконання сімейства визначається наступним чином:

$$t_{g_k}^H = \sum_{i=1}^f T_{g_i} - T_{g_k}.$$

Для призначення на останню позицію в σ^0 обираємо сімейство g_k з найменшим значенням функціоналу МВЗ з усіх $k = 1, \mathbf{K}, f$. Включаємо це сімейство в множину V призначених сімейств. Аналогічно визначаємо сімейство завдань g_l з множини $U \setminus V$, яке призначається на передостанню позицію в σ^0 :

$$t_{g_l}^H = \sum_{i \in U} T_{g_i} - T_{g_k} - T_{g_l}.$$

У загальному випадку момент початку виконання чергового сімейства g_r визначається як:

$$t_{g_r}^H = \sum_{i \in U} T_{g_i} - \sum_{i \in V} T_{g_i} - T_{g_r}.$$

Така процедура виконується до тих пір, поки не будуть призначені всі сімейства і не буде побудована послідовність σ^0 .

Етап 2. Послідовне виконання попарних перестановок сусідніх сімейств. Перестановки виконуються, якщо вони призводять до зменшення значення функціоналу. В алгоритмі А2 можливе використання також інших типів перестановок для отримання більш точного розв'язку, наприклад, NAPI, EBSR и EFSR [3].

Ілюстративний приклад. Алгоритм А1. В таблиці 1 наведено вхідні дані для 5 сімейств. В таблиці 2 – результати розрахунків, де $C_{g_i}^0 = t_{g_i}^{H^0} + T_{g_i}$; σ_{g_i} і F_{g_i} – послідовність завдань та функціонал МВЗ у сімействі g_i після розв'язання задачі МВЗ, $\sigma_{g_i}^\Phi$ і $F_{g_i}^\Phi$ – після вбудовування сімейств на Етапі 2.

Послідовність сімейств $\sigma^{yn} = 1, 2, 5, 3, 4$. $\sigma^0 = 1, 2, 3, 5, 4$. Значення функціоналу $F = 585$.

Таблиця 1 – Вхідні дані для алгоритму А1

j	1	2	3	4	5	6	7
Сімейство $g_1, S_{g_1} = 30$							
p_{1j}	10	10	10	15	20		
d_{1j}	75	85	95	65	50		
Сімейство $g_2, S_{g_2} = 40$							
p_{2j}	10	15	20	25	30		
d_{2j}	100	120	150	150	200		
Сімейство $g_3, S_{g_3} = 190$							
p_{3j}	25	30	35	40	40	45	50
d_{3j}	500	450	550	400	600	600	500
Сімейство $g_4, S_{g_4} = 150$							
p_{4j}	100	200	300	400	500		
d_{4j}	1300	1500	1800	2200	2700		
Сімейство $g_5, S_{g_5} = 10$							
p_{5j}	30	50	70	80	100		
d_{5j}	1030	750	820	900	1000		

За алгоритмом А2 отримана послідовність сімейств $\sigma^0 = 1, 2, 3, 5, 4$. Значення функціоналу $F = 985$. Функціонал збільшився за рахунок того, що в послідовності, отриманої за алгоритмом А1, мав місце простий обладнання перед виконанням сімейства 4.

Таблиця 2 – Результати розрахунків

i	1	2	3	4	5
$t_{g_i}^{H\sigma}$	0	55	205	1050	690
$C_{g_i}^{\sigma}$	95	195	660	2700	1030
σ_{g_i}	5, 4, 1, 2, 3	1, 2, 3, 4, 5	4, 2, 1, 7, 3, 5, 6	1, 2, 3, 4, 5	2, 3, 4, 5, 1
F_{g_i}	0	35	200	0	0
$t_{g_i}^H$	0	95	235	1050	690
C_{g_i}	95	235	690	2700	1030
$\sigma_{g_i}^{\Phi}$	5, 4, 1, 2, 3	1, 2, 3, 4, 5	2, 1, 4, 3, 6, 5, 7	1, 2, 3, 4, 5	2, 3, 4, 5, 1
$F_{g_i}^{\Phi}$	0	205	380	0	0

Обчислювальні результати. Алгоритм був закодований мовою C# у середовищі розробки Visual Studio 2010 під бібліотеку Microsoft .NET 4.0. Випробування проводилися на персональному комп'ютері із процесором Pentium CORE 2 Duo 2.0 ГГц із оперативною пам'яттю 2 Гбайта під управлінням ОС Microsoft Windows Vista. Досліджувалися задачі розмірності до 500 завдань у сімействі.

Для визначення ефективності алгоритмів були проведені дослідження залежності часу розв'язання задачі від кількості сімейств та середньої кількості завдань в сімействі.

Схема генерації даних, запропонована Фішером [6], використовувалася для тестування алгоритму на різних типах прикладів, тип задачі визначається комбінацією фактора запізнення T і діапазону директивних строків R . Для кожної задачі спочатку генеруються тривалості виконання і часи налагоджень із рівномірного розподілу із заданими границями. Потім обчислюються директивні строки з розподілу, рівномірного на $[p^*(1-T-R/2), p^*(1-T+R/2)]$, де p^* – сума всіх тривалостей. Значення T і R вибираються з множин $\{0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$ і $\{0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0\}$, відповідно, даючи по 20 задач кожного типу.

Результати досліджень наведені нижче в табл. 3 і 4.

Висновки. Ми представили два алгоритма розв'язання задачі МВЗГ, засновані на методі розв'язання задачі МВЗ, викладеному в [2, 3]. Алгоритм А1 призначений для розв'язання задачі у випадку, коли простої приладу дозволяються; алгоритм А2 – при їх забороні. Алгоритм А1 дає розв'язки, близькі до оптимальних. Дослідження показали, що алгоритми А1 і А2 дозволяють за прийнятний час ефективно розв'язувати задачі великої розмірності. Результати, що наведені в табл. 3 і 4, дані для випадку $T = 0.4$; $R = 0.8$. Майбутні

дослідження будуть спрямовані на вивчення поведінки алгоритму при різних значеннях R і T .

Таблиця 3 – Середній час розв'язання задач (сек.) для алгоритму А1

Завдань в сімействі	Кількість сімейств					
	2	4	8	10	20	30
50	0.08	0.16	0.33	0.42	0.86	1.30
100	0.21	0.42	0.86	1.08	2.20	3.35
150	0.36	0.73	1.49	1.87	3.83	5.81
200	0.53	1.08	2.20	2.77	5.66	8.59
250	0.72	1.46	2.98	3.75	7.67	11.6
300	0.92	1.87	3.82	4.81	9.82	14.9
350	1.13	2.31	4.71	5.93	12.1	18.4
400	1.36	2.77	5.65	7.11	14.5	22.1
450	1.59	3.25	6.64	8.35	17.1	25.9
500	1.84	3.75	7.66	9.64	19.7	29.9

Таблиця 4 – Середній час розв'язання задач (сек.) для алгоритму А2

Завдань в сімействі	Кількість сімейств					
	2	4	8	10	20	30
50	0.16	0.65	2.62	4.11	16.7	37.8
100	0.41	1.66	6.72	10.6	42.8	97.1
150	0.71	2.88	11.7	18.3	74.3	168.5
200	1.05	4.25	17.3	27.1	109.8	249.2
250	1.42	5.76	23.4	36.7	148.8	337.5
300	1.82	7.38	30.0	47.0	190.7	432.5
350	2.25	9.11	36.9	58.0	235.1	533.4
400	2.69	10.9	44.3	69.5	282.0	639.6
450	3.16	12.8	52.0	81.6	330.9	750.7
500	3.65	14.8	60.0	94.2	381.9	866.3

Список літератури: 1. Gupta J. N. D. Single Machine Group Scheduling with Setups to Minimize Total Tardiness / J. N. D. Gupta, S. Chantavarapan // International Journal of Production Research, Volume 46 (6). – 2008. – P. 1707–1722. 2. Павлов О. А. Дослідження властивостей та розв'язання задачі «Мінімізація сумарного штрафу як за випередження, так і за запізнення відносно директивних строків при виконанні незалежних завдань одним приладом» / О. А. Павлов, О. Б. Мисюра, О. В. Мельников // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – К.: «БЕК+», 2008. – № 48. – С. 3–6. 3. Згуровский М. З. Принятие решений в сетевых системах с ограниченными ресурсами / М. З. Згуровский, А. А. Павлов // Монография. – К.: Наукова думка. – 2010. – 573 с. 4. Ow P. S. The Single Machine Early/Tardy Problem / Ow P. S., Morton T. E. // Management Science. – Vol. 35. – № 2. – 1989. – P. 177–191. 5. Згуровский М. З. ПДС-алгоритмы и труднорешаемые задачи комбинаторной оптимизации / М. З. Згуровский, А. А. Павлов, Е. Б. Мисюра // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2009. – № 4. – С. 14–31. 6. Fisher M. L. A dual algorithm for the one-machine scheduling problem / Math. Programming, – № 11. – 1976. – P. 229–251.

Надійшла до редколегії 19.08.2011

М. Д. ГОДЛЕВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., зав. каф. АСУ НТУ «ХП»,
О. О. АБАБЛЮВ, студент, каф. АСУ НТУ «ХП»

РОЗРОБКА БІБЛІОТЕКИ ПАРАЛЕЛЬНИХ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ ORAPGA ДЛЯ РОБОТИ В МРІ-СЕРЕДОВИЩІ

У статті розглядаються вимоги до бібліотеки паралельних генетичних алгоритмів. Описано розроблену бібліотеку оgarга, що задовольняє цим вимогам. Наводиться діаграма варіантів використання та діаграма класів. Перелічено варіанти генетичних операторів, які надає бібліотека. Описано процес налаштування оgarга за допомогою конфігураційного файлу.

В статье рассматриваются требования к библиотеке паралельных генетических алгоритмов. Описана разработанная библиотека оgarга, удовлетворяющая этим требованиям. Приводится диаграмма вариантов использования и диаграмма классов. Перечислены варианты генетических операторов, которые предоставляет библиотека. Описывается настройка оgarга с помощью конфигурационного файла.

The article discusses the requirements for a library of parallel genetic algorithms. The developed orapga library satisfying these requirements is described. Use case and classes diagrams are given. Variants of genetic operators provided by the library are enumerated. Orapga setup process using a configuration file is described.

Вступ. На сьогоднішній день генетичні алгоритми довели свою конкурентноздатність при вирішенні багатьох NP-складних задач і особливо в практичних додатках, де математичні моделі мають складну структуру [1]. Тому вони зручні та продуктивні для розв'язання задачі створення розкладу, яка залишається однією з актуальних проблем в НТУ «ХП». Ідея генетичних алгоритмів запозичена у живої природи і полягає в організації еволюційного процесу [2], кінцевою метою якого є отримання оптимального рішення в складній комбінаторній задачі. Нами була обгрунтована доцільність застосування паралельних генетичних алгоритмів для рішення задачі складання розкладу, а також запропонована математична модель. Описано структуру особини й три типи паралельних генетичних алгоритмів для рішення задачі складання розкладу, виділені параметри, які впливають на ефективність описаних алгоритмів [3].

Для розв'язання задачі складання розкладу є доцільним відділити логіку предметної області від реалізації паралельних генетичних алгоритмів. Це дасть змогу:

- повторно використовувати бібліотеку генетичних алгоритмів для інших задач;
- покращувати реалізацію логіки предметної області без необхідності повторної компіляції бібліотеки генетичних алгоритмів;
- краще розподілити код по модулях, що спростить розробку та налагодження.

Вимоги до бібліотеки. Бажана бібліотека повинна мати наступні властивості:

- надавати широкий вибір варіантів генетичних операторів;
- дозволяти легко розширювати набір генетичних операторів;
- дозволяти конфігурувати отримане застосування, вказуючи у окремому файлі, які саме варіанти генетичних операторів потрібно використати та з якими параметрами;
- для легкості застосування більшість параметрів повинні мати значення за замовчуванням;
- реалізовані генетичні алгоритми мають бути паралелізовані з використанням бібліотеки МРІ [4];
- мова реалізації – С або С++;
- залежностей від сторонніх бібліотек має бути якомога менше.

Вимоги із точки зору кінцевого користувача наведено на діаграмі варіантів використання (див. рис. 1).

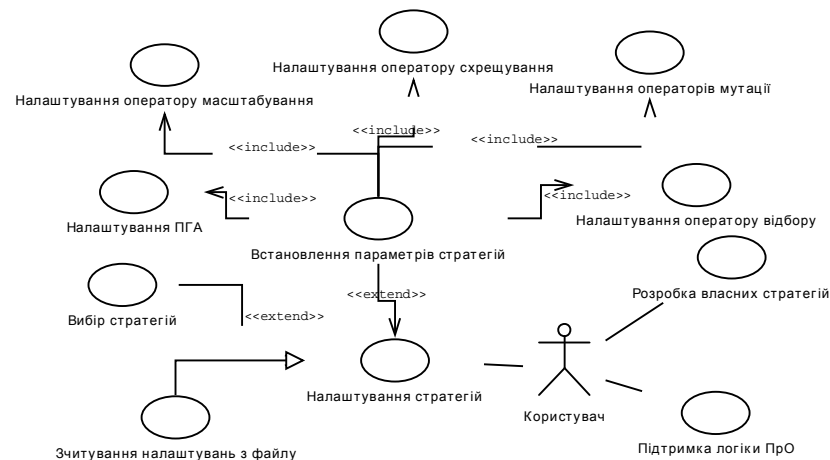


Рис. 1 – Діаграма варіантів використання

Опис бібліотеки оgarга. Бібліотека оgarга призначена для використання програмістами для будь-яких задач, в яких доцільно застосування генетичних алгоритмів. Програміст-користувач оgarга має можливість налаштувати наявні стратегії (оператори масштабування, вибору, схрещування та ін.), в тому числі зчитати налаштування з файлу. Крім того, можлива розробка власних стратегій, в тому числі тих, що забезпечують підтримку логіки конкретної предметної області.

Бібліотеку оgarга написано мовою С++. Створено складну ієрархію класів (див. рис. 2).

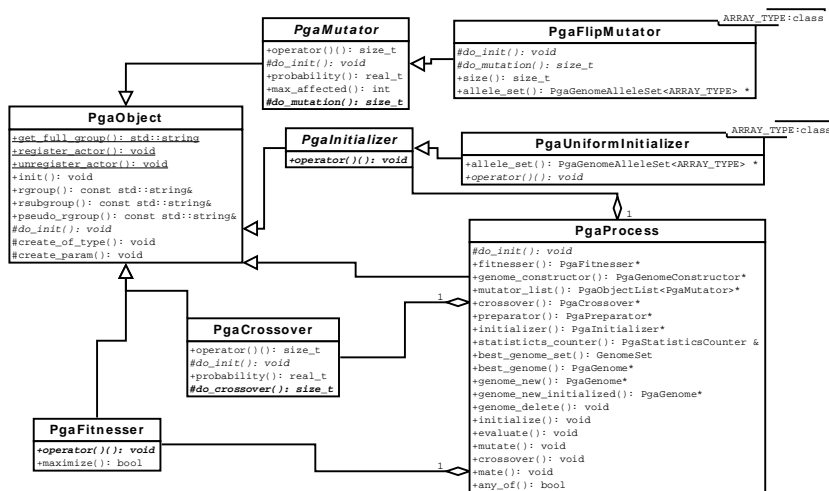


Рис. 2 – Фрагмент діаграми класів oarpga

Базовий клас для більшості класів – PgaObject. Цей клас забезпечує можливість динамічного створення об'єкту за іменем його класу та встановлення параметрів, що зберігаються в окремому об'єкті класу PgaParameterList. Останній клас зберігає іменовані параметри типів int, double, void*, bool, char та string та дозволяє зберегти себе або зчитати із текстового файлу формату X Resources [5], а також передати себе іншому процесу через MPI.

Основні потомки класу PgaObject:

- PgaFitter – базовий клас для визначення придатності особини;
- PgaCrossover – базовий клас операторів схрещування;
- PgaMutator – базовий клас операторів мутацій;
- PgaInitializer – базовий клас для ініціалізації особини;
- PgaSelector – базовий клас операторів відбору;
- PgaScaler – базовий клас операторів масштабування;
- PgaPopulation – базовий клас популяції;
- PgaCondition – базовий клас довільної умови, якій може задовольняти популяція;
- PgaProcess – базовий клас для основного процесу генетичного алгоритму.

Ці класи мають потомків, які реалізують конкретні стратегії. Наприклад, у PgaMutator є нащадок PgaFlipMutator – мутація flip.

Перелічимо основні варіанти генетичних операторів, реалізованих у oarpga:

- оператор відбору: roulette wheel, rank, tournament, uniform;
- оператор схрещування: even odd, one point, two point, uniform;
- оператор мутації: flip, swap;
- оператор масштабування: no scaling, linear.

Бібліотека oarpga містить три реалізації генетичних алгоритмів:

- непаралельний (зручний для налагодження програми);
- алгоритм, що використовує острівну модель (Multiple demes);
- алгоритм із динамічними демами (Dynamic demes).

Користувач має змогу як використовувати наявні класи стратегій, так і розробляти свої.

Генетичний пошук налаштовується за допомоги файлу формату X Resources. Для цього класи-нащадки PgaObject мають дві характеристики:

- рольова група: mutator, crossover тощо;
- рольова підгрупа: two_point, flip, swap тощо.

Щоб задати, який варіант генетичного оператора треба використовувати, потрібно вказати групу та підгрупу. Наприклад, для використання двох мутацій (спочатку flip, потім swap) потрібно вказати:

```
pga.mutator: flip,swap
```

Параметри генетичних операторів задаються наступним чином.

Для всіх об'єктів PgaFlipMutator встановити probability рівною 0.3:

```
pga.mutator.flip.probability: 0.3
```

Для всіх об'єктів PgaMutator встановити probability рівною 0.2:

```
pga.mutator*probability: 0.2
```

Якщо параметр не задано явно, буде використано значення за замовченням.

Висновки. Створено бібліотеку паралельних генетичних алгоритмів, яка надає широкий вибір готових генетичних операторів, дозволяє легко додавати нові класи та має зручний та потужний механізм налаштування генетичного пошуку. Розроблена бібліотека була використана у застосуванні пошуку розкладу занять вузу.

Розвитком даної бібліотеки є розширення набору готових класів та використання у різноманітних предметних областях.

Список літератури: 1. Holland, John H. Adaptation in Natural and Artificial Systems. Ann Arbor, MI : University of Michigan Press, 1975. – 228 p. 2. Darwin, Charles. On the Origin of Species by Means of Natural Selection. John Murray, 1859. – 502 p. 3. Годлевський М. Д., Абабілов О. О. Розробка та налаштування паралельних генетичних алгоритмів для розв'язання задачі створення розкладу занять вузу на основі GRID-системи // Вісник Національного технічного університету «ХП». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Системний аналіз, управління та інформаційні технології». – Х. : НТУ «ХП». – 2010. – №67. – С. 3-7. 4. Snir, Marc. MPI : The Complete Reference / Cambridge, Massachusetts : The MIT Press, 1996. – 350 p. 5. Р. Петерсон. Linux : руководство по операционной системе / Пер. с англ. – К. : Издательская группа BHV, 1998. – 480 с.

Надійшла до редколегії 16.06.2011

Н. А. МАРЧЕНКО, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПІ»;
Є. В. СОТНИКОВА, магістрант НТУ «ХПІ»

ОСОБЛИВОСТІ РОЗРОБКИ РОЗПОДІЛЕНОЇ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕВІРКИ ПСИХОЛОГІЧНОЇ СУМІСНОСТІ КОЛЕКТИВУ

Розглядаються особливості розробки розподіленої експертної системи та аналізуються різні методи реалізації перевірки психологічної сумісності колективу.

Рассматриваются особенности разработки распределенной экспертной системы и анализируются разные методы реализации проверки психологической совместимости коллектива.

There have been reviewed feature of the development a distributed expert system and analyzed different methods of testing psychological compatibility of staff realization.

Вступ. В сучасних умовах функціонування будь-якої організації постійно зростає інтерес до соціально-психологічного клімату колективу. Це є одним з першочергових питань, яке необхідно вирішувати керівникам як тільки починають з'являтися перші ознаки незлагодженості в групі його підлеглих [1].

Актуальність теми визначається в основному тим, що психологічне оточення первинного виробничого колективу обумовлене головним чином індивідуальними особливостями кожного з його членів. Крізь призму особистісних властивостей людини переломлюються всі впливи на неї як виробничого, так і невиробничого характеру. Тому для формування певного соціально-психологічного клімату колективу мають значення не стільки психологічні якості його членів, скільки ефект їхнього сполучення.

Незважаючи на існування різноманітних спеціалізованих тестових методик та індивідуальних підходів фахівців, застосування теорії експертних оцінок дозволяє визначити як якісні, так і кількісні характеристики на основі судження декількох різних експертів, що призводить до більш обґрунтованих висновків. Перевагами експертних систем є можливість формування рішень в умовах відсутності представницьких і достовірних статистичних даних про об'єкт дослідження, в умовах браку інформації або часу, відсутності чітких, формалізованих критеріїв їх оптимальності, невизначеності наслідків рішень, що приймаються, а недолік загалом пов'язаний із суб'єктивним характером експертної інформації [2]. Таким чином, розробка web-орієнтованої розподіленої експертної системи для перевірки психологічної сумісності колективу є актуальною задачею.

Постановка задачі. Метою даної роботи є створення розподіленої експертної системи та порівняння на її основі декількох методів перевірки психологічної сумісності в колективі.

Для досягнення поставленої мети необхідно створити web-сайт, який дозволяв би доступ користувачам, відповідно до їхнього статусу в системі, давав можливість проходження тестів та перегляду результатів. Крім цього, необхідно розробити структуру бази даних (БД) для зберігання інформації про людей, що належать до різних груп («користувачі», «експерти», «адміністратор»), а також тестових методик («питання», «варіанти відповідей», «роз'яснення»), відповідей користувачів і підсумкових результати експертного оцінювання.

Опис програмної реалізації розподіленої експертної системи. Для програмної реалізації поставленого завдання було обрано технологію web-програмування PHP, тому що вона є однією з найпопулярніших серверних скриптових мов, що переважає над іншими своєю простотою, швидкістю виконання, багатю функціональністю, кросплатформеністю та поширенню початкових кодів на основі ліцензії PHP.

Для будь-якої розподіленої системи невід'ємною частиною є база даних. Оскільки PHP містить вбудований сервер баз даних MySQL, тому саме за допомогою нього була реалізована необхідна БД. Вона складатиметься з дев'яти пов'язаних між собою таблиць та однією автономною, що відповідає за зміст статичних інформативних сторінок таких, як «Головна», «Контакти», «Про сайт». Щоб забезпечити швидке виконання запитів, база даних була нормалізована, що ілюструє інфологічна модель БД (див. рис. 1).

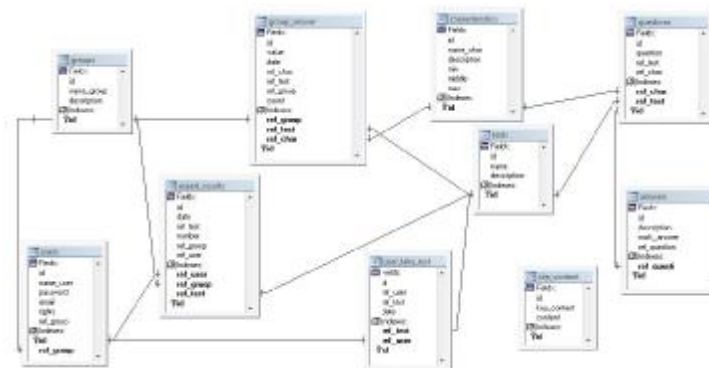


Рис. 1 – Інфологічна модель бази даних

Під час розробки розподіленої експертної системи перевірки психологічної сумісності колективу була використана система управління контентом (Content management system, CMS), тому що вона дає можливість

збирати в єдине ціле й поєднувати на основі ролей і завдань всі різні типи джерела знань й інформації, доступні як усередині організації, так і за її межами, а також можливість забезпечення взаємодії співробітників, робочих груп і проєктів зі створеними ними базами знань, інформацією й даними так, щоб їх легко можна було знайти, витягти й повторно використати звичним для користувача чином [3].

Однією з задач розподіленої експертної системи є авторизація та Використовування розмежованих прав доступу. Для їх організації були створені групи користувачів, які також зберігаються в базі даних. Для кожного з зареєстрованих користувачів визначається, до якої групи він належить. За допомогою механізму сесій відбувається ідентифікація користувача та зберігається інформація до змінних про все перебування в системі.

Крім частини експертної системи перевірки сумісності колективу, що доступна тільки зареєстрованим користувачам, була розроблена адміністративна. Вона дозволяє адміністраторові вносити зміни до створеної системи, реєструвати нових користувачів, надавати їм відповідні права доступу, додавати та редагувати тестові методика. Всі ці функції з легкістю доступні за допомогою платформно-незалежного, заснованого на JavaScript/HTML WYSIWYG редакторі TinyMCE [4] (Tiny Moxiecode Content Editor), що автоматично завантажується на сторінці адміністратора.

Методика тестування. Для перевірки психологічного клімату в колективі було обрано три тестові методики – «Експрес-методика», «Спілкування» та «Клімат в колективі». Кожен з користувачів, що належить до колективу, зобов'язаний проходити ці тести щомісячно. Після чого індивідуальні відповіді заносяться до бази даних та формується груповий результат, який в подальшому аналізується запрошеними експертами. Далі передбачено експертне оцінювання, в основу якого покладений алгоритм процедури Кемені. Відповідно до даної процедури на першому етапі експертами будується допоміжне строге колективне ранжування результатів тестів у порядку відданих пріоритетів. На другому – за допомогою розробленої програми будується матриця відносин, що формується на основі порівняння пріоритетів кожного з експертів. За результатами матриці відносин створюється матриця втрат, елементи якої визначають відстані від довільного ранжування до всіх ранжувань, зазначених фахівцями. Далі розраховуються рядкові суми та ітераційно вилучається мінімальна з них, що й очолює рейтинг колективного вибору, до остаточного формування результату ранжування експертних оцінок та виводу їх на екран.

Основні результати та висновки. В рамках науково-дослідної роботи було опитано виробничий колектив з 15 осіб за трьома тестовими методиками та залучено трьох експертів-психологів для аналізу кліматичної ситуації, які протягом тижня вивчали поведінку членів колективу відносно один одного, перебуваючи весь робочий час в офісі або стежачи по прихованих камерах. Зважаючи на отримані дані тестування та вивчену атмосферу з середини гру-

пи, фахівці провели експертне оцінювання. При цій процедурі враховувався головний показник – це відповідність спостережень до результатів тестування. Порядкові номери тестових методик були наступними: першою йшла «Експрес-методика», під другим номером – методика «Спілкування», а останньою – «Клімат у колективі». Експерти в свою чергу бачили результати не тільки під номерами, а ще й розписаними за характеристиками «відповідальність», «згуртованість», «відкритість» та ін.

Експерти	Пріоритет		
	1 місце	2 місце	3 місце
Експерт 1	«Клімат у колективі»	«Спілкування»	«Експрес-методика»
Експерт 2	«Спілкування»	«Експрес-методика»	«Клімат у колективі»
Експерт 3	«Клімат у колективі»	«Експрес-методика»	«Спілкування»

Як це видно з наведеної вище таблиці, експерти одногосними не були. Саме для таких суперечливих ситуацій актуальним способом досягнення компромісу є проведення експертного оцінювання, яке дало результат, зображений на рис. 2.



Рис. 2 – Результати експертизи

Таким чином, була розроблена розподілена експертна система для перевірки психологічної сумісності колективу, в якій передбачено різні права доступу. Розподілена експертна система була перевірена на кросбраузерність та протестована на конкретній групі людей, що довело її роботоспроможність.

Список літератури: 1. Андреева М. П. Профессиональные задачи социальной психологии в новой ситуации / М. П. Андреева // Психологический журнал. – 2005. – Т. 26, № 5. – С. 9–13. 2. Бешелев С. Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С. Д. Бешелев, Ф. Г. Гурвич. – М. : Статистика, 1982. – 263 с. 3. Мерсер Д. Диграл 6. Создание надежных и полнофункциональных веб-сайтов, блогов, форумов, порталов и сайтов-сообществ / Д. Мерсер. – М. : Вильямс, 2009. – 272 с. 4. Офіційний сайт HTML редактору TinyMCE: <http://tinymce.moxiecode.com>.

Надійшла до редколегії 19.05.2011

Ю. І. ДОРОФЄЄВ, доц., каф. САіУ, НТУ «ХПІ»;
К. С. БУЛАВІНА, студентка, каф. САіУ, НТУ «ХПІ»

АНАЛІЗ СПОЖИВЧОГО РИНКУ ЗАСОБІВ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ЗА ДОПОМОГОЮ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Метою дослідження є сегментація споживачів та виявлення взаємозв'язків між економіко-демографічними характеристиками респондентів та їх поведінкою на ринку. В даній роботі виконується анкетування 230 респондентів, які є споживачами засобів мобільного зв'язку. Результати анкетування проаналізовані за допомогою штучної нейронної мережі Кохонена, що самоорганізується. Отримані результати представлені візуально за допомогою метода паралельних координат.

Целью исследования является сегментация потребителей и выявление взаимосвязей между экономико-демографическими характеристиками респондентов и их поведением на рынке. В данной работе выполняется анкетирование 230 респондентов, которые являются потребителями средств мобильной связи. Результаты анкетирования проанализированы с помощью самоорганизующейся искусственной нейронной сети Кохонена. Полученные результаты представлены визуально с помощью метода параллельных координат.

The primary focus of the research concentrates on consumers and the relationship between interconnection of economic and demographic activities of the respondents and their behavior in the marketplace. This questionnaire is designed for 230 respondents who are consumers of mobile communication. The results of the questionnaire have been analyzed by using the self-organizing artificial neural network of Kohonen as the instrument. The data can be seen by referring to parallel coordinates as the visual instrument.

Введення. Проведення маркетингових досліджень – це складний багатоступінчастий процес, що вимагає глибокого знання об'єкта вивчення, від точності та своєчасності результатів якого багато в чому залежить успішне функціонування всього підприємства.

Ринок складається зі споживачів, що мають схожі потреби, однак сукупність покупців ніколи не буває однорідною. Споживачів занадто багато, а їхні бажання й потреби часом діаметрально протилежні. Вони відрізняються вибором товару, якому віддають перевагу, сумою грошей, яку готові заплатити за товар, і джерелами одержання інформації. Отже, метою маркетингових досліджень є сегментація споживчого ринку, щоб вибрати один або декілька сегментів для освоєння.

Ринковий сегмент – це група споживачів, що мають особливі, істотно важливі для розробки стратегії маркетингу, характеристики. На більшості ринків необхідність розробки пропозицій стосовно до конкретних сегментів очевидна, оскільки один різновид товару не здатний одночасно задовольнити попит всіх споживачів [1]. Маркетингові дослідження дозволяють прийняти рішення про випуск нового продукту та його позиціонування на ринку, про фінансування нового проекту або спрямованість рекламних акцій.

У теперішній час для здійснення аналізу великих масивів даних все частіше використовують концепції та методи штучного інтелекту, зокрема штучні нейронні мережі. Для складних недостатньо формалізованих задач застосування нейронних мереж дозволяє швидко отримати результати, які можуть значно перевершувати результати, що отримані за допомогою традиційних методів розв'язання інтелектуальних задач [2].

Постановка задачі. На основі опитування респондентів провести аналіз споживчого ринку засобів мобільного зв'язку за допомогою штучних нейронних мереж, тобто встановити взаємозв'язки між економіко-демографічними показниками споживачів та їх вибором і поведінкою на ринку засобів мобільного зв'язку. Перевірити придатність отриманих результатів для використання у маркетинговій діяльності.

Отримання вхідних даних. Для збору даних була сформована анкета для опитування респондентів та проведено опитування у місті Харкові.

В анкетуванні взяло участь 230 респондентів. Серед опитуваних були як чоловіки, так і жінки, у віці від 18 до 55 років, з різним рівнем доходу. Опитування проводилося як серед перехожих на вулиці й у метро, так і за допомогою соціальних мереж.

У перелік характеристик, які необхідно повідомити респондентові про себе, входять наступні:

- вік;
- стать;
- рід занять;
- середній місячний дохід на одного члена родини.

В процесі обробки анкет ці дані були закодовані шляхом присвоєння порядкового номеру відповіді та представлені у вигляді масиву вхідних даних X розміром 4×230 .

Для графічного відображення результатів анкетування використано секторну діаграму, яку приведено на рис. 1.

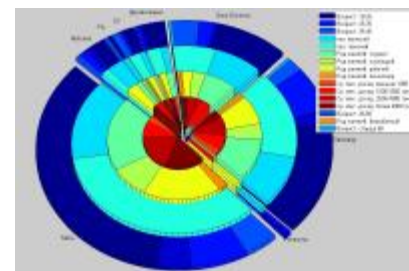


Рис. 1 – Відображення результатів анкетування

Кожен сектор діаграми відповідає одній з торгівельних марок засобів мобільного зв'язку, якими користуються респонденти на цей час. Довжина

дуги сектора вираховується з процентного відношення респондентів, які належать до цього сектора, до всіх опитуваних респондентів.

Рівень сектора описує економіко-демографічний показник опитаних респондентів. Кожен рівень має свої кольори, розбиті на сектора, які вказують на процентне відношення категорій в економіко-демографічному показнику до всієї множини цього показника. Відношення вираховується згідно обраного сектора, тобто марки телефону.

Метод кластерного аналізу. Кластерний аналіз є одним з найбільш відомих методів математичної статистики, що використовуються для сегментування споживачів. Він є одним з методів розвідувального аналізу даних, створених для виявлення можливих угруповань, які присутні у сукупності даних. Основним критерієм для об'єднання даних у групи є відстань: об'єкти, розташовані "близько" один до одного, повинні попадати в той самий кластер, тоді як "досить далекі" об'єкти повинні бути в різних кластерних групах. В ідеальному випадку всі об'єкти усередині кластера повинні бути досить однорідними, але значно відрізнитися від об'єктів з інших кластерів. Результатом успішно проведеної кластеризації є виділення ряду сегментів усередині загального набору даних.

Основною метою при проведенні кластерного аналізу є виділення природно виникаючих груп досліджуваних об'єктів на основі їхньої схожості. Але при практичному застосуванні конкретних методів з'являються відмінності, які пов'язані з різними способами обчислення відстані між двома спостереженнями (або кластерами) та з правилами, які використовуються для формування кластерів.

Методи кластерного аналізу можна розділити на дві групи: ієрархічні та неієрархічні. Ієрархічні алгоритми кластерного аналізу можуть бути двох типів – агломеративні та дивізімні.

Ієрархічні агломеративні методи характеризуються послідовним об'єднанням елементів і відповідним зменшенням числа кластерів. На початку роботи алгоритму всі об'єкти є окремими кластерами. На першому кроці найбільш схожі об'єкти об'єднуються в кластер. На наступних кроках об'єднання продовжується до тих пір, поки всі об'єкти не будуть складати один кластер.

Ієрархічні дивізімні методи є логічною протилежністю агломеративних методів. На початку роботи алгоритму всі об'єкти належать одному кластеру, який на наступних кроках ділиться на менші кластери, в результаті утворюється послідовність розщеплених груп.

Неієрархічні методи не вимагають, щоб об'єкти, що потрапили в кластер, залишалися в цьому ж кластері протягом усього подальшого процесу кластеризації. Одним з найпоширеніших методів неієрархічної кластеризації є алгоритм k -середніх. При його використанні дослідник повинен попередньо задати необхідне число кластерів k , і робота алгоритму приведе до виявлення в даних саме заданого числа кластерів.

Результати кластеризації даних можуть бути зображені у вигляді дендрограми. Дендрограма описує близькість окремих точок та кластерів один до одного та графічно зображує послідовність об'єднання (роз'єднання) кластерів (рис. 2).

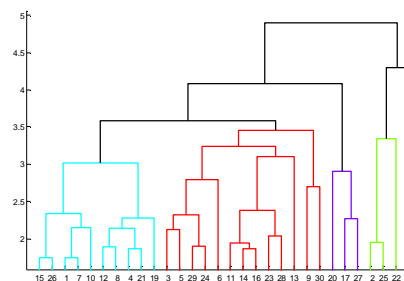


Рис. 2 – Зображення результатів кластерного аналізу у вигляді дендрограми

На рисунку можна виділити п'ять груп взаємозв'язаних показників, що представляються єдиною точкою п'ятивимірного простору: стать, вік, рід занять, середній місячний дохід та марка мобільного телефону, якою користується респондент на даний момент. Причому не можливо виявити внутрішнього взаємозв'язку між характеристиками об'єкта та виявити їх вплив на вибір марки телефону, якою зараз користується респондент. Тому для подальшого аналізу обрано штучні нейронні мережі Кохонена, що самоорганізуються.

Експериментальний аналіз ринку засобів мобільного зв'язку за допомогою штучних нейронних мереж. Штучна нейронна мережа Кохонена являє собою набір впорядкованих нейронів, навчання яких здійснюється «без вчителя» шляхом самоорганізації.

Основною метою шару Кохонена є співвіднесення векторів-сигналів, що подаються на нейронну мережу, з вихідним результатом кластеризації, здійснюючи таким чином розв'язання задачі кластеризації і розпізнавання образів. Це досягається за допомогою такого підстроювання ваг нейронів, при якому близькі вхідні вектори активують один і той же нейрон.

На рис. 3 зображена загальна архітектура мережі Кохонена.

Вектор входів X , розмірністю $N \times 1$, містить в собі параметри кластеризації. Матриця IW – вагова матриця розмірністю $K \times N$, i -й рядок якої містить ваги i -го нейрона, а вектор W_0 розмірністю $K \times 1$ – вектор зміщень нейронів. Вони представляють собою параметри мережі Кохонена, що налаштовуються. Блок S описує обчислення відстані між векторами ваг нейронів та поданим на вхід вектором X . Відстань між нейронами обчислюється згідно з заданою функцією: евклідова, принцип квадратних

ансамблів, принцип ланцюга, відстань Манхетена. F – активаційна функція нейронів. Y – вектор виходів мережі, який представляє результат кластеризації.

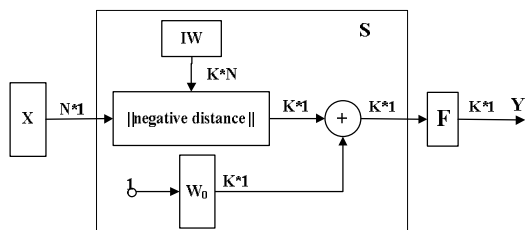


Рис. 3 – Загальна архітектура мережі Кохонена

Алгоритм навчання мережі Кохонена передбачає самонавчання по правилу “переможець забирає все”. Ваговим коефіцієнтам мережі перед початком навчання треба присвоїти початкові значення. Загально прийнятою практикою при роботі з нейронними мережами є присвоєння вагам невеликих випадкових значень. При навчанні шару Кохонена випадково обрані вагові вектори варто нормалізувати. Остаточні значення вагових векторів після навчання збігаються з нормованими вхідними векторами. Тому нормалізація перед початком навчання наближає вагові вектори до їх остаточних значень, скорочуючи, таким чином, процес навчання [3].

Після навчання така нейронна мережа візуально відображає багатомірні вхідні дані на площині нейронів. Таке зображення даних дає можливість побачити наявність або відсутність взаємозв'язків у вхідних даних. Перед мережею, що навчається «без учителя» ставиться мета виявити скриті закономірності, що присутні в наборі вхідних даних.

Для формування нейронної мережі Кохонена необхідно визначити кількість кластерів, на які розбиваються вхідні дані. В якості даних, що підлягають кластеризації, виступають характеристики респондента: вік, стать, рід занять, середній місячний дохід на одного члена родини, та відповідь на чергове запитання про пристрасті та переваги респондента.

Після формування архітектури нейронної мережі необхідно виконати ініціалізацію її параметрів та здійснити процес навчання. Розташування кожного нейрона у просторі ознак характеризується значеннями нейронних ваг. За допомогою нейронної мережі, навчання якої завершено, здійснюється кластеризація всіх векторів з вибірки. При цьому кожен вектор порівнюється з вектором ваг нейрона, який є центром кластера, що являє собою деяке узагальнення властивостей, характерних певної області багатомірних даних.

Для візуалізації результатів використовується метод паралельних координат, згідно з яким будується декілька паралельних горизонтальних осей, які перетинають одну вертикальну вісь координат. Для кожного кластера на осях відмічаються значення ознак, які є для нього типовими, потім отримані точки з'єднуються. Отриманий набір ліній вказує на зв'язок між ознаками.

Результати експериментів показали, що торговельною маркою Nokia користуються в основному чоловіки, службовці з середнім місячним доходом в 2500–4000 грн у віці 18–35 років; торговельною маркою LG в основному користуються робітники з середнім місячним доходом в 1000–2500 грн; торговій марці Motorola віддають перевагу жінки віком 25–35 років. Дані результати приведені на рис. 4.

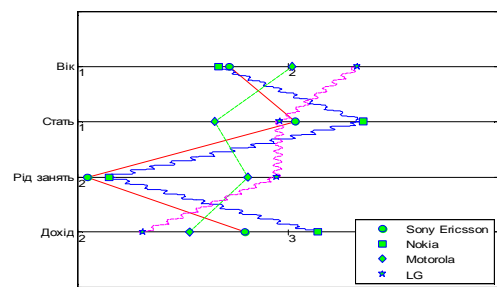


Рис. 4 – Результат візуалізації результатів методом паралельних координат

Висновки. В роботі запропоновано методику автоматизації процесу аналізу великих масивів вихідних даних за допомогою штучних нейронних мереж Кохонена, що самоорганізуються. Запропоновану методику застосовано для розв'язання задачі кластеризації та послідуочої сегментації користувачів мобільного зв'язку. Описаний підхід може бути застосований при прийнятті маркетингових рішень, наприклад, про випуск нового продукту та його позиціонування на ринку, про фінансування нового проекту або спрямованість рекламних акцій.

Список літератури: 1. Котлер Ф. Основы маркетинга / Ф. Котлер. – М. : «Прогресс», 1991. – 796 с. 2. Данько Т. П. Системы искусственного интеллекта в разработке корпоративных маркетинговых стратегий / Т. П. Данько, М. А. Ходимчук. – М. : «Финпресс», 2001. – 255 с. 3. Гвидо Д. Анализ финансовых данных с помощью самоорганизующихся карт / Д. Гвидо, Т. Кохонен. – М. : «Альпина Бизнес Букс», 2001. – 317 с.

Надійшла до редколегії 20.05.2011

В. П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
К. Б. ФЕДЯНИНА, аспирант НТУ «ХПИ»

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НЕЧЕТКОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПАРОВОЙ ТУРБИНОЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Побудована математична модель системи автоматичного керування частотою обертання ротора парової турбіни енергоблоку АЕС з нечітким ПІ регулятором. Представлені результати параметричного синтезу регуляторів, що отримані комбінованим генетичним алгоритмом.

Построена математическая модель системы автоматического управления частотой вращения ротора паровой турбины энергоблока АЭС с нечетким ПИ регулятором. Представлены результаты параметрического синтеза регуляторов комбинированным генетическим алгоритмом.

Mathematical model of automatic control system for rotation frequency rotor of steam turbine of atomic power plant with fuzzy PI controller is built. Results of parametric synthesis of controllers by combined genetic algorithm are presented.

Введение. Для систем автоматического управления (САУ) паровыми турбинами АЭС актуальна задача синтеза оптимального регулятора, обеспечивающего наилучшие прямые показатели качества САУ [1, 2]. Среди стандартных линейных регуляторов частоты вращения ротора турбины наилучшим является ПИД регулятор [3]. Для повышения качества систем управления паровыми турбинами перспективно использование регуляторов, построенных на основании нечеткой логики [2, 4]. В задачах параметрического синтеза оптимальных САУ с нечеткими регуляторами характерно наличие множества локальных экстремумов, что приводит к необходимости использования методов глобального поиска, в частности – генетических алгоритмов [4–6]. Особенности задач параметрического синтеза систем управления приводят к необходимости модификации генетических алгоритмов [7, 8].

Цель статьи состоит в представлении методов, моделей и результатов параметрического синтеза нечеткого регулятора в системе управления паровой турбиной АЭС К-1000-60/1500 с использованием модификации генетического алгоритма и сравнении нечеткого регулятора с ПИД регуляторами.

Постановка задачи синтеза оптимальной САУ. Для задачи параметрического синтеза системы автоматического управления на основании ограничений вектора переменных параметров $x \in R^p$ введем области [8]:

$$G_1 = \{x \mid a \leq x \leq b\}; \quad G_2 = \{x \mid \alpha_i(x) > 0, i = \overline{0, n}\}; \quad G_k = \{x \mid \rho_{k-1}(x) > 0\}, \quad k = \overline{3, n};$$

$$D_1 = G_1; \quad D_k = D_{k-1} \cap G_k, \quad k = \overline{2, n}; \quad H_0 = R^p \setminus D_1; \quad H_k = D_k \setminus D_{k+1}, \quad k = \overline{1, n-1};$$

где a и b – векторы нижних и верхних ограничений для вектора x ; $\alpha_i(x)$ – коэффициенты характеристического многочлена линеаризованной САУ; n – порядок САУ; $\rho_k(x)$ – элементы первого столбца таблицы Рауса. Таким образом, в области D_n выполняются условия технической реализуемости и устойчивости САУ, которым соответствуют скалярные штрафные функции:

$$S(x) = \sum_{i=1}^p [\max\{0, a_i - x_i\} + \max\{0, x_i - b_i\}], \quad P(x) = \sum_{i=0}^n \max\{0, -\alpha_i(x)\}.$$

Для удержания процесса синтеза в допустимой области использована векторная штрафная функция, первая проекция которой $F_1(x)$ соответствует количеству выполненных ограничений, а вторая проекция $F_2(x)$ представляет штраф нарушенного ограничения:

$$F_s(x) = \begin{cases} (0; P(x)), & x \in H_0, \\ (1; S(x)), & x \in H_1, \\ (k; -\rho_k(x)), & x \in H_k, \quad k = \overline{2, n-1}. \end{cases} \quad (1)$$

Переход в допустимую область системы управления сведен к оптимизации векторной функции (1) на основании сравнения двух ее произвольных значений $U = (U_1; U_2)$ и $V = (V_1; V_2)$ операцией «лучше»:

$$U < V = \begin{cases} 1, & (U_1 > V_1) \vee [(U_1 = V_1) \wedge (U_2 < V_2)], \\ 0, & (U_1 < V_1) \vee [(U_1 = V_1) \wedge (U_2 \geq V_2)]. \end{cases} \quad (2)$$

Для оценки качества САУ применим прямые показатели качества (ППК) [9]: перерегулирование $\sigma(x)$, размах колебаний $\zeta(x)$, время регулирования $t_c(x)$ и его относительное значение $\tau(x) = t_c(x)/T_f$, где T_f – время наблюдения переходного процесса. Задачу синтеза системы управления по ППК сформулируем как задачу условной оптимизации:

$$x \in D_n, \quad \sigma(x) \leq \sigma_m, \quad \zeta(x) \leq \zeta_m, \quad \min \tau(x),$$

где σ_m и ζ_m – заданные предельно допустимые значения ППК.

Для учета приоритета прямых показателей качества определим области:

$$G_{n+1} = \{x \mid \sigma(x) \leq \sigma_m\}, \quad G_{n+2} = \{x \mid \zeta(x) \leq \zeta_m\};$$

$$D_k = D_{k-1} \cap G_k, \quad k = \overline{n+1, n+2};$$

$$H_k = D_k \setminus D_{k+1}, \quad k = \overline{n, n+1}; \quad H_{n+2} = D_{n+2}.$$

Для синтеза системы управления по прямым показателям качества на основании функции (1) сформируем векторную целевую функцию

$$F(x) = \begin{cases} F_S(x), & x \notin D_n; \\ (n; \sigma(x) - \sigma_m), & x \in H_n; \\ (n+1; \zeta(x) - \zeta_m), & x \in H_{n+1}; \\ (n+2; \tau(x)), & x \in H_{n+2}. \end{cases} \quad (3)$$

Синтез оптимальных регуляторов. Пропорциональный (П), интегральный (И) и реализуемый дифференциальный (Д) регуляторы формируют управляющие действия u_p , u_I и u_D на объект управления по ошибке ε согласно выражениям [8]:

$$u_p = K_p \varepsilon; \quad du_I/dt = \lambda_I \varepsilon; \quad dv_D/dt = -\lambda_D (v_D + K_D \varepsilon), \quad u_D = v_D + K_D \varepsilon, \quad (4)$$

где K_p , λ_I , λ_D и K_D – параметры регуляторов. По техническим условиям переменные в задаче синтеза параметры K_p , λ_I , $\lambda_D \in [0; 100]$, $K_D = 10$.

Рис. 1 изображает схему нечеткого ПИ регулятора с системой нечеткого вывода (СНВ), которая показана на рис. 2 и включает базу правил, блоки фаззификации, нечеткого вывода и дефаззификации.

На рис. 3 показаны симметричные треугольные и трапециевидальные функции принадлежности входной ξ и выходной η переменных СНВ: $\xi_n = -\xi_p$, $\eta_n = -\eta_p$.

Простейшая база правил СНВ содержит три правила:

$$1) \xi = N_\xi \Rightarrow \eta = N_\eta, \quad 2) \xi = Z_\xi \Rightarrow \eta = Z_\eta, \quad 3) \xi = P_\xi \Rightarrow \eta = P_\eta.$$

Управляющее действие u нечеткого ПИ регулятора формируется с помощью нелинейной функции СНВ f_F по выражениям (см. рис. 1):

$$u = u_p + u_I, \quad u_p = f_F(K_p \varepsilon, \xi_p, \eta_p) K_u, \quad du_I/dt = \lambda_I \varepsilon. \quad (5)$$

Вектор переменных параметров нечеткого ПИ регулятора включает пять параметров, которые могут принимать значения из заданных интервалов:

$$x = (K_p, \lambda_I, K_u, \xi_p, \eta_p); \quad K_p, \lambda_I, K_u \in [0; 100]; \quad \xi_p, \eta_p \in [0; 1].$$

Таким образом, модель системы с нечетким ПИ регулятором является нелинейной моделью. Для синтеза такой САУ целесообразно оптимизировать целевую функцию модифицированными генетическими алгоритмами.

Модификация генетических алгоритмов. Векторная целевая функция (3) является разрывной и многоэкстремальной, поэтому для повышения надежности синтеза САУ применим генетические алгоритмы [4–8].

Модификация генетических алгоритмов (ГА) выполнена по основным принципам этих алгоритмов [4–6]. Каждая особь популяции представлена хромосомой $\xi = (\xi_1, \xi_2, \mathbf{K}, \xi_p)$ длины $M = mp$, состоящей из бинарных генов $\xi_i = (\xi_{i1}, \xi_{i2}, \mathbf{K}, \xi_{im})$ длины $m = 32$, $i = \overline{1, p}$, $\xi_{ij} \in \{0; 1\}$ и определяющей вектор переменных $x = (x_1, x_2, \mathbf{K}, x_p)$.

Хромосомы $\Pi = (\xi^{(1)}, \xi^{(2)}, \mathbf{K}, \xi^{(N)})$, точки $P = (x^{(1)}, x^{(2)}, \mathbf{K}, x^{(N)})$, значения векторной целевой функции $\Phi = (F^{(1)}, F^{(2)}, \mathbf{K}, F^{(N)})$ образуют популяцию размера N .

Хромосомы начальной популяции $\Pi^{(0)}$ формируются случайно, для следующих популяций применяются генетические операторы: селекция, кроссовер, мутация. На k -той итерации формируется популяция особей, которой соответствуют массивы хромосом $\Pi^{(k)}$, точек $P^{(k)}$ и значений целевой функции $\Phi^{(k)}$. Применяется ранговая селекция с принципом рулетки (*Roulette*): популяция сортируется сравнением значений векторной целевой функции (*Sort*); родительской особи сопоставляется сектор колеса рулетки, пропорциональный ее рангу; по принципу рулетки выбираются родители для скрещивания. Одноточечным кроссовером (*Crossover*) с последующей мутацией (*Mutate*) формируется новая популяция. Разработан модифицированный бинарный генетический алгоритм.

Модифицированный бинарный ГА. Входные параметры: a и b – векторы ограничений, N – размер популяции, m – длина гена, r_p – доля

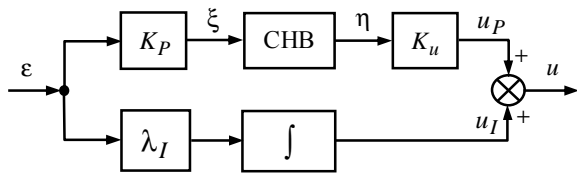


Рис. 1 – Схема нечеткого ПИ регулятора



Рис. 2 – Система нечеткого вывода

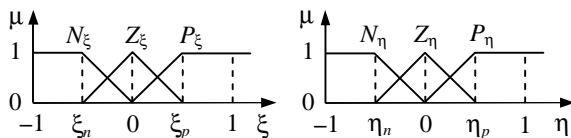


Рис. 3 – Функции принадлежности

родительских пар в популяции, r_m – доля мутации, N_k – предельное число итераций. Выходные параметры: x и F_x – лучшая точка и значение в ней векторной целевой функции. **1.** Положить $k=1$, $p = \dim(a)$, $l = b - a$, $M = m \cdot p$. **2.** Вычислить $N_p = [r_p \cdot N]$, $n_p = [0,5 \cdot (N - N_p)]$, $n_m = [(N - 1) \cdot r_m \cdot M]$. **3.** Вычислить $\Pi = \text{Round}(\text{Rand}(N, M))$. **4.** Вычислить $P = \text{Decod}(\Pi, a, l, m)$. **5.** Для $j = \overline{1, N}$ вычислить $\Phi_j = F(P_j)$. **6.** Положить $(\Phi, J) = \text{Sort}(\Phi)$, $\Pi = \Pi(J)$, $P = P(J)$, $\Pi_p = \Pi(1 : N_p)$. **7.** Вычислить $(N_1, N_2) = \text{Roulette}(N_p, n_p)$. **8.** Вычислить $(\pi_1, \pi_2) = \text{Crossover}(\Pi_p, N_1, N_2)$. **9.** Положить $\Pi = (\Pi_p, \pi_1, \pi_2)$, $\Pi = \text{Mutate}(\Pi, n_m)$. **10.** Вычислить $P = \text{Decod}(\Pi, a, l, m)$. **11.** Для $j = \overline{1, N}$ вычислить $\Phi_j = F(P_j)$. **12.** Положить $(\Phi, J) = \text{Sort}(\Phi)$, $\Pi = \Pi(J)$, $P = P(J)$, $\Pi_p = \Pi(1 : N_p)$. **13.** Положить $x = P_1$, $F_x = \Phi_1$. **14.** Если $k < N_k$, положить $k = k + 1$ и перейти к п. 7. **15.** Выход.

Основное отличие этого алгоритма от генетических алгоритмов для оптимизации скалярных целевых функций состоит в использовании значений векторной целевой функции для точек популяции и в сортировке этих значений на шагах 6 и 12 с применением операции сравнения векторов (2).

Генетические алгоритмы как методы глобальной оптимизации позволяют находить глобальный минимум целевой функции с небольшой точностью. Для повышения точности поиска разработан комбинированный генетический алгоритм, представляющий объединение бинарного генетического алгоритма и метода Нелдера-Мида [8].

Моделирование САУ паровой турбины для задачи синтеза. Модель паровой турбины К-1000-60/1500 как объекта управления имеет вид [3]:

$$dX_T/dt = A_T X_T + B_{Tu} u + B_{Tv} v, \quad \varphi = C_T X_T, \quad (6)$$

где X_T – вектор состояния турбины; A_T , B_{Tu} , B_{Tv} и C_T – матрицы со значениями постоянных параметров турбины; u – входное управляющее воздействие регулятора частоты (РЧ); v – возмущающее воздействие по нагрузке турбины; φ – выходная переменная относительного отклонения частоты вращения ротора турбины от номинального значения; порядок модели $n = 19$.

Объединением модели (6) и выражений (4) при $\varepsilon = -\varphi$ определены линейные модели САУ частотой (САУЧ) с ПИ и ПИД регуляторами для возмущающего воздействия $v = -1(t)$, соответствующему сбросу нагрузки турбины в номинальном режиме и переходу в режим холостого хода [3]:

$$dX/dt = A(x)X + Bv, \quad y = 100CX, \quad (7)$$

где $y = 100\varphi$ – выходная переменная отклонения частоты в процентах.

Для системы автоматического управления частотой с ПИ регулятором

$$X = \begin{pmatrix} X_T \\ u_I \end{pmatrix}, \quad A(x) = \begin{pmatrix} A_T - B_{Tu} K_p C_T & B_{Tu} \\ -\lambda_I C_T & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} B_{Tv} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad C = (C_T \ 0),$$

где $x = (K_p, \lambda_I)$ – вектор переменных параметров; порядок модели $n = 20$.

Для САУЧ с ПИД регулятором матрицы в модели (7) имеют вид:

$$X = \begin{pmatrix} X_T \\ u_I \\ v_D \end{pmatrix}, \quad A(x) = \begin{pmatrix} A_T - B_{Tu}(K_p + K_D)C_T & B_{Tu} & B_{Tu} \\ -\lambda_I C_T & 0 & 0 \\ \lambda_D K_D C_T & 0 & -\lambda_D \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} B_{Tv} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$C = (C_T \ 0 \ 0).$$

Порядок этой модели $n = 21$, вектор переменных $x = (K_p, \lambda_I, \lambda_D)$.

Модель с нечетким ПИ регулятором получена объединением модели (6) и выражений (5) при $\varepsilon = -\varphi$

$$\frac{dX_F}{dt} = \begin{pmatrix} A_T X_T + B_{Tu}(f_F(-K_p \varphi, \xi_p, \eta_p) K_u + u_I) + B_{Tv} v_s \\ -\lambda_I \varphi \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Вектор переменных $x = (K_p, \lambda_I, K_u, \xi_p, \eta_p)$, порядок модели $n = 20$.

Синтез регуляторов систем управления паровой турбиной. Для синтеза САУЧ путем оптимизации целевой функции (3) заданы значения параметров: ограничения ППК $\sigma_m = 4$ и $\zeta_m = 1$, параметр зоны установившегося значения частоты $\delta_y = 0,1$, время интегрирования систем дифференциальных уравнений (7) и (8) $T_f = 20$ с, число шагов интегрирования $L = 400$.

В таблице для трех РЧ – ПИ (PI), ПИД (PID) и нечеткого ПИ (FPI) регуляторов приведены полученные комбинированным генетическим алгоритмом оптимальные значения параметров K_p^* , λ_I^* , λ_D^* , K_u^* , ξ_p^* , η_p^* и соответствующие им значения ППК САУЧ σ^* , ζ^* , t_c^* .

Результаты синтеза параметров регуляторов частоты

РЧ	K_p^*	λ_I^*	λ_D^*	K_u^*	ξ_p^*	η_p^*	σ^*	ζ^*	t_c^* , с
PI	100,0	26,5	—	—	—	—	3,47	1,00	5,19
PID	98,13	33,5	1,69	—	—	—	3,36	0,91	4,20
FPI	1,498	45,0	—	49,65	0,56	0,31	2,56	0,87	3,13

На рис. 4 представлены переходные процессы изменения переменной y

для частоты вращения ротора паровой турбины в оптимальных системах, соответствующих приведенной таблице. Эти результаты позволяют сделать вывод, что нечеткий ПИ регулятор (FPI) с оптимальными значениями параметров обеспечивает наиболее быстрый переходный процесс с наименьшими значениями максимального отклонения частоты σ^* и размаха колебаний ζ^* .

Выводы. Синтез параметров оптимальных регуляторов с учетом приоритета прямых показателей качества систем автоматического управления свелен к оптимизации векторной целевой функции, для чего модифицирован генетический алгоритм. Приведена математическая модель системы управления паровой турбиной с нечетким регулятором. Результаты синтеза параметров регуляторов частоты вращения ротора турбины показывают, что нечеткий ПИ регулятор обеспечивает переходный процесс с наименьшими максимальным отклонением частоты, размахом колебаний и временем регулирования.

Список литературы: 1. *Северин В. П.* Методы анализа и синтеза систем автоматического управления энергоблоков атомных электростанций / В. П. Северин // Проблемы обеспечения безопасности информационных и управляющих систем АЭС. Одесса : Астропринт, – 2010. – С. 137-152. 2. *Северин В. П.* Синтез систем автоматического управления энергоблока АЭС с нечеткими регуляторами генетическими алгоритмами / В. П. Северин, Сейед Моджтаба Джафари Хенджани, В. Ф. Чернай // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. Ч. 1. – С. 147–152. 3. *Федянина К. Б.* Оптимизация следящего привода и систем управления паровой турбиной с использованием генетических алгоритмов / К. Б. Федянина, Е. А. Кучер, В. П. Северин // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2009. Ч. 5. – С. 86–91. 4. *Гостев В. И.* Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / В. И. Гостев. – К. : Радиоаматор, 2005. – 708 с. 5. *Панченко Т. В.* Генетические алгоритмы. Учебное пособие / Т. В. Панченко. – Астрахань : Изд. дом «Астраханский университет», 2007. – 88 с. 6. *Alireza M.* Genetic algorithms / M. Alireza. – Tehran : Naghoos, 2008. – 144 p. 7. *Severin V. P.* Application of Genetic Algorithms to Vector Optimization of the Automatic Control Systems / V. P. Severin // Intelligent Information and Engineering Systems. Information Science and Computing. Information Technologies and Knowledge. – 2009. N. 13. Vol. 3. – P. 90–97. 8. *Джафари Хенджани Сейед Моджтаба* Многокритериальный синтез нечетких систем автоматического управления генетическими алгоритмами / Сейед Моджтаба Джафари Хенджани, В. П. Северин, Е. Н. Никулина // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2010. Ч. 2. – С. 149–154. 9. *Бесекерский В. А.* Теория систем автоматического управления / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – СПб. : Профессия, 2004. – 752 с.

Надійшла до редколегії 12.05.2011

УДК 519.8

В. П. СЕВЕРИН, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;
Н. Ю. СЕВЕРИНА, ассистент НТУ «ХПИ»;
М. Н. ВИТЯЗЬ, студент НТУ «ХПИ»

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЯДЕРНЫМ РЕАКТОРОМ ВВЭР-1000

У статті розглянуто покроковий підхід багатокритеріального синтезу систем автоматичного управління потужністю ядерного реактора за прямими показниками якості. Представлена структурна схема лінійної системи автоматичного управління нейтронною потужністю реактора. Побудована математична модель ПІ регулятора. Проведено багатокритеріальний синтез систем управління і виконано аналіз отриманих результатів.

В статье рассмотрен пошаговый подход многокритериального синтеза систем автоматического управления мощностью ядерного реактора по прямым показателям качества. Представлена структурная схема линейной системы автоматического управления нейтронной мощностью реактора. Построена математическая модель ПИ регулятора. Проведен многокритериальный синтез систем управления и выполнен анализ полученных результатов.

This article describes the step-by-step approach of automatic control systems multicriterion synthesis of reactor capability by direct quality indexes. The block diagram of automatic line control of neutron reactor power is carried out. The mathematical model of the proportional–integral controller is constructed. The multicriterion synthesis of control system has been carried out and the analysis of findings has been performed.

Введение. Основной задачей автоматического управления ядерным реактором ВВЭР-1000 атомной электростанции (АЭС) является управление нейтронной мощностью [1, 2]. Создание современных сложных систем автоматического управления (САУ) приводит к проблеме оптимизации их показателей качества, которая характеризуется большим количеством конструктивных и обобщенных параметров моделей систем управления и необходимостью учёта многих ограничений, накладываемых на эти параметры и на критерии качества систем. Современные САУ мощностью (САУМ) ядерного реактора должны удовлетворять многочисленным требованиям, среди которых требования надежности, устойчивости, быстродействия, качества процессов и многие другие. Эти требования должны учитываться при проектировании моделей САУМ в виде ограничений параметров этих моделей. Множество ограничений моделей систем управления имеет иерархическую структуру, которую целесообразно учитывать при многокритериальном синтезе систем.

Цель статьи состоит в рассмотрении методов многокритериального синтеза систем автоматического управления нейтронной мощностью ядерного реактора ВВЭР-1000 по прямым показателям качества (ППК).

Обосновывается пошаговый подход синтеза САУ. На основании модели реактора разрабатываются модели САУМ ядерного реактора с различными типами регуляторов. Решаются задачи синтеза регуляторов для САУМ ядерного реактора, проводится анализ эффективности регуляторов.

Обоснование пошагового метода. Для решения задач синтеза САУМ применяется пошаговый подход, основанный на иерархии критериев с уровнями притязаний и переходе к оптимизации векторной целевой функций (ВЦФ) [2]. Основная идея пошагового принципа заключается в том, чтобы упорядочить все ограничения модели САУ в процессе ее проектирования и во время поиска оптимального решения последовательно их выполнять, пока не встретится нарушенное ограничение (активное), которое и будет задавать направление поиска. Это позволит последовательно увеличивать общее количество выполненных ограничений, приближаясь к допустимой области.

Для реализации пошагового подхода формируется двумерная ВЦФ:

$$F(x) = \left\{ \left(k(x), g_{k+1}(x) \right) \mid x \in H_k, k = \overline{0, M} \right\}, \quad (1)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_p) \in R^p$ – вектор варьируемых параметров;

$k(x)$ или $F_1(x)$ – функция уровня, равная числу последовательно выполненных ограничений;

$g_{k+1}(x)$ или $F_2(x)$ – функция штрафа, которая при $k = \overline{0, M-1}$ является функцией ограничения и при его нарушении становится штрафной функцией;

M – количество ограничений задачи синтеза;

$g_{M+1}(x)$ – минимизируемая целевая функция.

В формуле (1) также используются области уровней ограничений

$$H_0 = R^p \setminus D_1, \quad H_k = D_k \setminus D_{k+1}, \quad k = \overline{1, M-1}, \quad H_M = D_M, \quad (2)$$

где $D_1 = G_1, D_k = D_{k-1} \cap G_k, k = \overline{2, M}$ – квазидопустимые области;

$G_k = \{ x \mid g_k(x) \leq 0 \}, k = \overline{1, M}$ – области ограничений.

В области уровня (2) с номером k выполняется ровно k ограничений, а следующее ограничение с номером $k+1$ нарушается. Степень нарушения этого ограничения отображает его функция $F_2(x)$. Таким образом, любую точку поиска $x \in R^p$ характеризуют две величины: количество выполненных ограничений $F_1(x) = k(x)$, принимающее значения от 0 до M , и значение штрафной функции активного ограничения $F_2(x) = g_{k+1}(x)$. Чтобы из недопустимой точки перейти в допустимую, необходимо максимизировать функцию уровня $F_1(x)$. Она является кусочно-постоянной функцией любой точки

x и по ней самой затруднительно установить направление ее возрастания. Поэтому для максимизации функции уровня применяется вторая функция $F_2(x)$, характеризующая величину нарушения активного ограничения. Минимизация функции штрафа приведет к выполнению активного ограничения, а значит к возрастанию количества выполненных ограничений, то есть к росту функции уровня $F_1(x)$.

Итак, реализация пошагового метода заключается в следующей стратегии: на каждом шаге метода минимизируется функция штрафа $F_2(x)$ при неубывании функции уровня $F_1(x)$. Как только активное ограничение удовлетворяется, оно становится пассивным, $F_1(x)$ возрастает и начинается следующий шаг метода. Переход из любой недопустимой точки пространства варьируемых параметров в допустимую точку выполняется не более чем за M шагов. Реализация стратегии оптимизации ВЦФ осуществляется с учетом приоритета ее проекций в едином вычислительном процессе. Первая проекция, с большим приоритетом, максимизируется, а вторая – минимизируется. При сравнении двух значений ВЦФ (1) $U = (U_1, U_2)$ и $V = (V_1, V_2)$ применяется бинарная операция «лучше» \mathbf{p} :

$$U \mathbf{p} V = \begin{cases} 1, & U_1 > V_1 \vee U_1 = V_1 \wedge U_2 < V_2, \\ 0, & U_1 < V_1 \vee U_1 = V_1 \wedge U_2 \geq V_2. \end{cases} \quad (3)$$

Для реализации предложенного пошагового подхода можно модифицировать любой численный метод безусловной минимизации функций многих переменных. Пошаговый подход можно применять для любых сложных технических систем, задача проектирования которых может быть сформулирована как задача нелинейной параметрической оптимизации.

Моделирование системы автоматического управления мощностью ядерного реактора. Структурная схема линейной модели САУМ ядерного реактора, основанная на линейной точечной модели ядерного реактора с шестью группами запаздывающих нейтронов, представлена на рис. 1 [2].

На вход САУМ подается уставка мощности v_s , выходом является нейтронная мощность v . Текущее значение нейтронной мощности измеряется ионизационной камерой и отрицательной обратной связью подается на сумматор, формируя сигнал ошибки $\varepsilon = v_s - v$. Ошибка поступает на вход регулятора мощности (РМ) с передаточной функцией (ПФ) $W_C(s)$, который по заданному закону управления формирует управляющее воздействие u . Управляющее воздействие подается на привод исполнительного механизма (ИМ) системы управления и защиты реактора. ИМ перемещает управляющий стержень и изменяет составляющую реактивности ρ_d , которая передается в

модель ядерного реактора и изменяет вектор его состояния X_R , изменяя нейтронную мощность реактора.

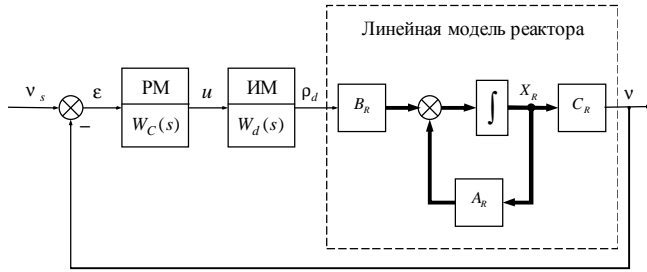


Рис. 1 – Структурная схема линейной САУМ ядерного реактора

ИМ опишем инерционным звеном первого порядка с передаточной функцией и соответствующим дифференциальным уравнением (ДУ):

$$W_d(s) = \frac{K_d}{T_d s + 1}, \quad \frac{d\rho_d}{dt} = a_{dd}\rho_d + b_{du}u, \quad a_{dd} = -\frac{1}{T_d}, \quad b_{du} = \frac{K_d}{T_d},$$

где K_d и T_d – коэффициент усиления и постоянная времени привода.

Рассмотрим пропорциональный (П), интегральный (И) и дифференциальный (Д) регуляторы и соответствующие им законы управления, которые реализуются ПФ и ДУ П, И и Д регуляторов:

$$u_p = K_p \varepsilon, \quad u_I = \frac{1}{T_I} \int \varepsilon dt, \quad u_D = \tau_D \frac{d\varepsilon}{dt},$$

$$W_P = K_p, \quad W_I(s) = \frac{1}{T_I s}, \quad W_D(s) = \frac{K_D T_D s}{T_D s + 1},$$

$$\frac{du_I}{dt} = \lambda_I \cdot \varepsilon, \quad \frac{dv_D}{dt} = -\lambda_D \cdot (v_D + K_D \cdot \varepsilon), \quad u_D = v_D + K_D \cdot \varepsilon.$$

где u_p , u_I , u_D – законы управления регуляторов.

K_p , T_I , T_D , $\lambda_I = 1/T_I$, $\lambda_D = 1/T_D$ – параметры регуляторов;

$K_D > 1$ и обычно $K_D = 10$, а $\tau_D = K_D T_D$ – параметр закона управления, близкого к дифференциальному.

По моделям П, И и Д регуляторов построим модели ПИ, ПД, ИД и ПИД регуляторов. Для оптимизации параметров K_p , λ_I и λ_D сформируем из них

вектор варьируемых параметров (ВВП) $x \in R^p$. Для П и И регуляторов $p = 1$, для ПИ, ПД и ИД регуляторов $p = 2$, для ПИД – $p = 3$.

На примере модели ПИ регулятора, уравнения ИМ и линейной модели ядерного реактора [2] определим линейную математическую модель САУМ реактора в пространстве состояний (см. рис. 1):

$$\frac{dX}{dt} = AX + Bv_s, \quad v = CX, \quad (4)$$

$$X = \begin{pmatrix} X_R \\ \rho_d \\ u_I \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} A_R & B_R & 0 \\ -b_{du}K_p C_R & a_{dd} & b_{du} \\ -\lambda_I C_R & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ b_{du}K_p \\ \lambda_I \end{pmatrix}, \quad C = \begin{pmatrix} C_R \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}^T. \quad (5)$$

Порядок полученной модели САУМ с ПИ регулятором $n = 12$.

Проведя анализ статики САУМ с различными регуляторами [2] можно сделать вывод, что Д регулятор неприменим в САУМ, так как заданное значение мощности v_s не достигается. Поэтому в дальнейшем будем рассматривать модели САУМ с П, И, ПИ, ПД, ИД и ПИД регуляторами.

Многокритериальный синтез регуляторов. На основании матрицы $A = A(x)$ модели (4), (5) методом Фаддеева [3] определим коэффициенты характеристического многочлена $\alpha_i(x) > 0$, $i = \overline{0, n}$ и элементы первого столбца таблицы Рауса $\rho_k(x)$, $k = \overline{2, n-1}$.

Для оптимизации ППК САУМ реактора формируется ВЦФ вида (1):

$$F(x) = \begin{cases} (0; S(x)), & x \in H_0, \\ (1; P(x)), & x \in H_1, \\ (k; -\rho_k(x)), & x \in H_k, \quad k = \overline{2, n-1}, \\ (n; \sigma(x)), & x \in H_n, \\ (n+1; \zeta(x)), & x \in H_{n+1}, \\ (n+2; \tau(x)), & x \in H_{n+2}. \end{cases} \quad (6)$$

где $S(x) = \sum_{i=1}^n [\max\{0, a_i - x_i\} + \max\{0, x_i - b_i\}]$ и $P(x) = \sum_{i=0}^n \max\{0, -\alpha_i(x)\}$ – штрафные функции нарушения двусторонних ограничений ВВП $a_i \leq x_i \leq b_i$, $i = \overline{1, p}$ и учёта необходимых условий устойчивости соответственно;

$\sigma(x)$, $\zeta(x)$ и $\tau(x) = t_c(x)/T_f$ – прямые показатели качества – перерегулирование, размах колебаний и относительное значение времени

регулирования $t_c(x)$ соответственно, вычисленные путем решения системы дифференциальных уравнений (4) при $t \in [0; T_f]$.

Эта функция учитывает двусторонние ограничения варьируемых параметров, необходимые и достаточные условия устойчивости САУМ и требования к её ППК. ВЦФ (6) вычислим, объединив вычисление векторной штрафной функции неустойчивости и пошаговой векторной функции прямых критериев [2]. Для оптимизации параметров регуляторов САУМ функцию (6) будем оптимизировать с использованием операции сравнения (3) векторными методами адаптации шага при $p=1$ или Нелдера-Мида при $p>1$, с допустимой погрешностью по параметрам $\varepsilon = 10^{-10}$.

В табл. 1 для линейных моделей САУМ с различными типами РМ представлены оптимальные значения параметров РМ K_p^* , λ_I^* , λ_D^* , а также соответствующие им значения проекций функции (6) F_1^* , F_2^* и времени регулирования t_c^* . Поскольку $F_1^* = n+2$, то все ограничения задач оптимизации ППК выполнены в оптимальных точках, которым отвечают монотонные переходные процессы с оптимальными значениями перерегулирования $\sigma^* = 0$ и показателя колебательности $\zeta^* = 0$.

На рис. 2 представлены переходные процессы в САУМ с ПИ регулятором при разных значениях верхнего ограничения пропорциональной составляющей K_p .

Табл. 1 – Результаты оптимизации РМ

РМ	K_p^*	λ_I^*	λ_D^*	F_1^*	F_2^*	t_c^* , с
P	45,8	—	—	13	0,231	23,19
I	—	0,082	—	14	0,343	343,25
PI	100	2,594	—	14	0,137	13,78
PD	100	—	0,043	14	0,114	11,42
ID	—	0,082	100,00	15	0,343	343,33
PID	100	2,594	99,852	15	0,137	13,78

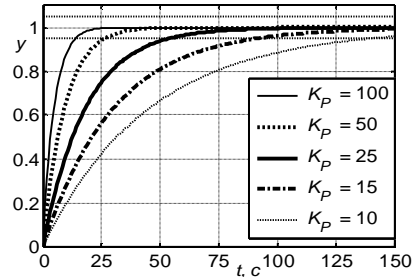


Рис. 2 – Оптимизация ПИ регулятора

На рис. 3 и 4 представлен процесс оптимизации ППК для САУМ с ПИ регулятором векторным методом Нелдера-Мида (МНМ) с начальным шагом $\delta = 1$. Здесь на графиках проекций $F_1(x)$ и $F_2(x)$ ВЦФ (6) и ВВП из $x_1 = K_p$ и $x_2 = \lambda_I$ показаны лучшие точки поиска. Начальная точка отмечена кругом: $x^{(0)} = (5; 1)$, $F^{(0)} = (12; 0,2609)$, $\sigma^{(0)} = 0,2609$; конечная – ромбом. Показатели конечной точки приведены в табл. 1. На вычисление оптимального решения

векторный МНМ потратил 226 итераций с 456 вычислениями функции (6), причем получено 164 лучших точек поиска. В пределах траектории лучших точек функция уровня $F_1(x)$ на рис. 1 принимает значения 12 и 14, которым соответствуют процессы с перерегулированием и монотонные процессы. График функции штрафа $F_2(x)$ на рис. 2 состоит из графиков функций перерегулирования $\sigma(x)$ и относительного времени регулирования $\tau(x)$. При уменьшении значения K_p в окрестности оптимальной точки возрастает перерегулирование. При уменьшении λ_I вблизи оптимальной точки увеличивается время регулирования монотонного переходного процесса, а при увеличении – увеличивается перерегулирование.

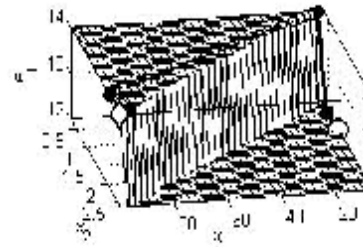


Рис. 3 – Функция уровня

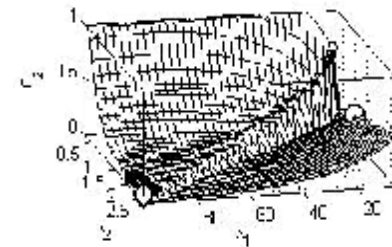


Рис. 4 – Функция штрафа

Выводы. Данная статья посвящена математическому моделированию и оптимизации показателей качества САУМ ядерного реактора ВВЭР-1000. Результаты исследований позволяют сделать следующие выводы.

1. Рассмотрен пошаговый подход многокритериального синтеза САУМ по ППК, позволяющий в едином вычислительном процессе выполнить ограничения ВВП, перейти в область устойчивости и оптимизировать ППК.
2. Представлена структурная схема линейной САУМ реактора. Построена математическая модель ПИ регулятора САУ ядерного реактора для решения задач оптимизации ППК.
3. Рассмотрен пример многокритериального синтеза САУМ ядерного реактора. Проведен анализ полученных результатов оптимизации прямых критериев качества для систем управления мощностью ядерного реактора.

Список литературы: 1. Иванов В. А. Регулирование энергоблоков / В. А. Иванов. – Л. : Машиностроение, 1982. – 311 с. 2. Витязь М. Н. Многокритериальный синтез регуляторов системы управления ядерным реактором ВВЭР-1000 в пакете MATLAB / М. Н. Витязь, В. П. Северин // Труды V Международной научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB». – Харьков : ФЛП Шейнина Е. В. – 2011. – С. 254–282. 3. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц, 4-е изд. / Ф. Р. Гантмахер. – М. : Наука, 1988. – 552 с.

Надійшла до редколегії 08.03.2011

О. Б. МОКІН, канд. техн. наук, доц. ВНТУ, м. Вінниця

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ОПТИМАЛЬНОГО РУХУ ЗАВАНТАЖЕНОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ НА ПІДЙОМАХ І СПУСКАХ

В статті побудовано математичні моделі оптимального руху завантаженого електричного транспортного засобу на підйомах і спусках за критерієм мінімуму витрат електроенергії в умовах обмеження на час.

В статье построены математические модели оптимального движения нагруженного электрического транспортного средства на подъемах и спусках по критерию минимума затрат электроэнергии в условиях ограничения на время.

In this paper had been created a mathematical model of optimal movement of the loaded electric vehicle on the climbs and descents on the criterion of minimum electricity consumption within the constraints of time.

Постановка задачі і вихідні передумови. В роботі [1] показано, що для розв'язання задачі оптимізації руху електричного транспортного засобу колією, прокладеною на місцевості зі складним рельсфом, необхідно спочатку колію розбити на відрізки горизонтального прямолінійного руху, руху на спусках і підйомах та руху на закругленнях колії, а потім розв'язувати задачу оптимізації руху на кожному відрізку окремо, з'єднуючи ці розв'язки між собою граничними умовами.

Виходячи з математичних моделей, запропонованих в роботах [2, 3], в роботі [4] отримані математичні моделі оптимального за критерієм мінімуму витрат електроенергії руху завантаженого електричного транспортного засобу горизонтальним прямолінійним відрізком колії у вигляді моделі відносного струму якоря електродвигунів тягового електропривода електровоза

$$i = \frac{1}{2b_1} \left(\frac{f_1 + 2f_2v}{e^{(t+C_1)(f_1+2f_2v)} - C_0} - a_1 \right) \quad (1)$$

та моделі відносної лінійної швидкості руху транспортного засобу

$$v(t) = \sum_{k=0}^n g_k L_k(t), \quad (2)$$

методика визначення поліномів Лагерра $L_k(t)$ та усіх коефіцієнтів в яких наведена в роботі [4], а співвідношення переходу від відносних одиниць до іменованих — в роботі [5].

Мета роботи. В даній роботі буде показано, яких змін набудуть математичні моделі (1), (2) в разі оптимізації руху завантаженого електричного транспортного засобу на спуску і підйомі, тобто на відрізках колії відповідно AC і DM в позначеннях рис. 1 роботи [1].

Розв'язання задачі. Спочатку розглянемо спуск завантаженого електричного транспортного засобу по відрізку AC .

Для зручності відтворимо на рис. 1 даної статті рис. 3 роботи [3].

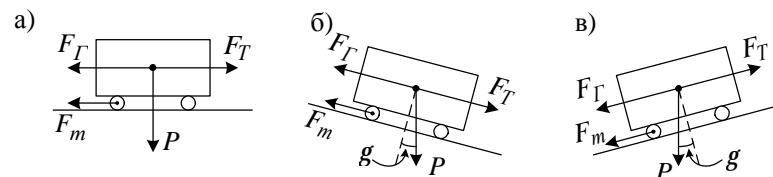


Рис. 1 – Сили, що діють на вагон під час руху: а – по горизонтальній площині; б – на спуск; в) на підйом

Із рис. 1 видно, що при наявності в складі електричного транспортного засобу електровоза та $(n-1)$ вагонів гальмівна сила F_T усього транспортного засобу на малих лінійних швидкостях V після того, як останній його вагон піде на спуск, складатиме

$$F_T = k \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \cos g - \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \sin g, \quad (3)$$

де P_i – вага i -го вагона, g – кут нахилу площини спуску до горизонтальної площини, який дорівнює куту між силою ваги та перпендикуляром до площини спуску, а k – коефіцієнт тертя кочення сталюого колеса по сталій рейці.

Зі зростанням лінійної швидкості електричного транспортного засобу у гальмівній силі, як показано в роботі [3], з'являються складові, пропорційні лінійній швидкості та її квадрату, тобто більш загальна модель гальмівної сили матиме вигляд

$$F_T = k \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \cos g - \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \sin g + k^* \left(\sum_{i=1}^n S_{Bi} \right) V + k^{**} S_{Л1} V^2, \quad (4)$$

де S_{Bi} – площа бічної поверхні i -го вагона, $S_{Л1}$ – площа лобової поверхні електровоза, k^* , k^{**} – розмірні коефіцієнти пропорційності відповідно між силою та добутком площі на швидкість і добутком площі на квадрат швидкості.

З урахуванням виразу (4) та результатів, отриманих у роботах [3, 5], математичну модель динаміки руху електричного транспортного засобу на спуску можна записати у вигляді:

$$\left(\sum_{i=1}^n m_i \right) \frac{dV}{dt} = F_{T1} - k \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \cos g + \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \sin g - k^* \left(\sum_{i=1}^n S_{Bi} \right) V - k^{**} S_{J1} V^2, \quad (5)$$

або (у відносних одиницях) —

$$\frac{dv}{dt} = ij(i) - (f_0 \cos g - f_{00} \sin g) - f_1 v - f_2 v^2, \quad (6)$$

де

$$f_{00} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n P_i \right)}{F_T^n}, \quad (7)$$

а усі інші коефіцієнти і змінні мають той самий зміст, що і відповідні коефіцієнти та змінні, наведені в роботі [5].

Порівнюючи рівняння (6) з рівнянням (2) роботи [5], бачимо, що вони відрізняються лише тим, що у рівнянні (6) у правій частині стоїть член $(f_0 \cos g - f_{00} \sin g)$ замість f_0 , а структура обох рівнянь є однаковою. А це означає, що і структури моделей оптимального струму та оптимальної швидкості теж будуть однаковими, але коефіцієнти C_0 , C_1 моделі оптимального струму залежатимуть не лише від коефіцієнта f_0 , але і від коефіцієнта f_{00} та кута g і знака між складовими з f_0 та f_{00} , оскільки вони визначатимуться не з системи рівнянь (34), (35) роботи [5], а з аналогічної, але трансформованої системи рівнянь:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4b_1} \left[\frac{f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_N)}{e^{(t_N+C_1) \left(f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_N) \right)} - C_0} - a_1 \right] + \\ & + \frac{a_1}{2b_1} \left[\frac{f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_N)}{e^{(t_N+C_1) \left(f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_N) \right)} - C_0} - a_1 \right] - \\ & - (f_0 \cos g - f_{00} \sin g) - f_1 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_N) - f_2 \left(\sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_N) \right)^2 - v'_N = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4b_1} \left[\frac{f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_B)}{e^{(t_B+C_1) \left(f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_B) \right)} - C_0} - a_1 \right] + \\ & + \frac{a_1}{2b_1} \left[\frac{f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_B)}{e^{(t_B+C_1) \left(f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_B) \right)} - C_0} - a_1 \right] - \\ & - (f_0 \cos g - f_{00} \sin g) - f_1 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_B) - f_2 \left(\sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_B) \right)^2 - v'_B = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Тож для визначення оптимального струму тягового електропривода під час руху електричного транспортного засобу на спуску з заданою лінійною швидкістю, яка є функцією граничних умов, необхідно знайдені із системи рівнянь (8), (9) значення коефіцієнтів

$$C_0 = C_0(f_{00}, g, -), \quad C_1 = C_1(f_{00}, g, -) \quad (10)$$

підставити у вираз (1).

Дамо фізичну інтерпретацію отриманого результату. Внаслідок нахилу площини спуску на кут g сила тертя кочення, яка є пропорційною силі ваги і нормальною до площини кочення, зменшується, і одночасно за рахунок тангенціальної складової сили ваги з'являється додаткова сила тяги. Тож для підтримання заданої лінійної швидкості на спуску необхідно зменшувати силу тяги, створювану тяговим електроприводом електровоза, що досягається заміною коефіцієнтів C_0 , C_1 в моделі струму (1) їх значеннями з множини (10).

Тепер розглянемо рух завантаженого електричного транспортного засобу на підйом по відрізьку DM .

Із рис. 1 видно, що при наявності в складі електричного транспортного засобу електровоза та $(n-1)$ вагонів гальмівна сила F_T усього транспортного засобу на малих лінійних швидкостях V після того, як останній його вагон піде на підйом, складатиме

$$F_T = k \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \cos g + \left(\sum_{i=1}^n P_i \right) \sin g. \quad (11)$$

Тож за аналогією з викладеним вище математичну модель динаміки руху електричного транспортного засобу під час руху на підйом можна записати у вигляді

$$\left(\sum_{i=1}^n m_i\right) \frac{dV}{dt} = F_{T1} - k \left(\sum_{i=1}^n P_i\right) \cos g - \left(\sum_{i=1}^n P_i\right) \sin g - k^* \left(\sum_{i=1}^n S_{Bi}\right) V - k^{**} S_{J1} V^2, (12)$$

або (у відносних одиницях) —

$$\frac{dv}{dt} = ij(i) - (f_0 \cos g + f_{00} \sin g) - f_1 v - f_2 v^2. (13)$$

А це означає, що і модель оптимального струму тягового електропривода під час руху завантаженого електричного транспортного засобу на підйом буде за структурою такою ж самою, як і під час руху по горизонтальній площині, проте коефіцієнти C_0 , C_1 моделі оптимального струму, як для спуску, залежатимуть не лише від коефіцієнта f_0 , але і від коефіцієнта f_{00} та кута g і знака між складовими з f_0 та f_{00} , оскільки вони визначатимуться не з системи рівнянь (34), (35) роботи [5], а з аналогічної, але трансформованої системи рівнянь

$$\frac{1}{4b_1} \left[\frac{f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_N)}{e^{(t_N+C_1) \left(f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_N) \right)} - C_0} - a_1 \right] + \frac{a_1}{2b_1} \left[\frac{f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_N)}{e^{(t_N+C_1) \left(f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_N) \right)} - C_0} - a_1 \right] - (14)$$

$$-(f_0 \cos g + f_{00} \sin g) - f_1 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_N) - f_2 \left(\sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_N) \right)^2 - v'_N = 0,$$

$$\frac{1}{4b_1} \left[\frac{f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_B)}{e^{(t_B+C_1) \left(f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_B) \right)} - C_0} - a_1 \right] + \frac{a_1}{2b_1} \left[\frac{f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_B)}{e^{(t_B+C_1) \left(f_1 + 2f_2 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_B) \right)} - C_0} - a_1 \right] - (15)$$

$$-(f_0 \cos g + f_{00} \sin g) - f_1 \sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_B) - f_2 \left(\sum_{k=0}^4 g_k L_k(t_B) \right)^2 - v'_B = 0.$$

Тож для визначення оптимального струму тягового електропривода під час руху електричного транспортного засобу на підйом з заданою лінійною швидкістю, яка є функцією граничних умов, необхідно знайдені із системи рівнянь (14), (15) значення коефіцієнтів

$$C_0 = C_0(f_{00}, g, +), \quad C_1 = C_1(f_{00}, g, +) (16)$$

підставити у вираз (1).

Дамо фізичну інтерпретацію і цьому результату. Внаслідок нахилу площини підйому на кут g сила тертя кочення, яка є пропорційною силі ваги і нормальною до площини кочення, під час підйому, як і під час спуску, зменшується, але одночасно за рахунок тангенціальної складової сили ваги з'являється додаткова гальмівна сила. Тож для підтримання заданої лінійної швидкості під час руху на підйом необхідно збільшувати силу тяги, створювану тяговим електроприводом електровоза, що досягається заміною коефіцієнтів C_0 , C_1 в моделі струму (1) їх значенням з множини (16).

Висновки. Досліджено особливості оптимізації руху завантаженого електричного транспортного засобу на спусках і підйомах. Показано, що структура математичної моделі оптимального струму тягового електропривода електровоза під час руху на спусках і підйомах не змінюється у порівнянні зі структурою математичної моделі струму, що забезпечує оптимальний рух завантаженого електричного транспортного засобу відрізком прямолінійної горизонтальної колії, але суттєвої зміни зазнають коефіцієнти цієї структури. Побудовано алгоритм визначення коефіцієнтів математичної моделі оптимального струму електровоза під час руху завантаженого електричного транспортного засобу на спусках і підйомах.

Список літератури: 1. Мокін О. Б. Особливості моделювання руху електричних транспортних засобів з врахуванням залежності навантаження від рельєфу місцевості [Електронний ресурс] / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін // Наукові праці ВНТУ. – 2010. – № 1. – С. 1–6. – Режим доступу до журн.: http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2010_1/2010-1.files/uk/10abmlor_ua.pdf. 2. Мокін Б. І. Математичні моделі багатомасових розподілених динамічних систем для задач оптимізації (частина 1) / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 6. – С. 55–58. 3. Мокін Б. І. Математичні моделі багатомасових розподілених динамічних систем для задач оптимізації (частина 2) / Б. І. Мокін, О. Б. Мокін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2009. – № 1. – С. 28–33. 4. Мокін О. Б. Оптимізація режиму руху завантаженого електричного транспортного засобу на прямолінійному відрізку колії, прокладений на горизонтальній площині / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2010. – № 3/2010 (62), частина 2. – С. 162–165. 5. Мокін О. Б. Відносні моделі руху електричного транспортного засобу по горизонтальному прямолінійному відрізку колії / О. Б. Мокін, Б. І. Мокін // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 2. – С. 20–24.

Надійшла до редколегії 28.04.2011

Ю. В. МИХЛИН, д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор НТУ «ХПИ»;
С. Н. РЕШЕТНИКОВА, канд. техн. наук, доцент НТУ «ХПИ»;
Е. Б. АХИЕЗЕР, канд. техн. наук, доцент, доцент НТУ «ХПИ»

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ШАХТНЫМИ ПОДЪЕМНЫМИ УСТАНОВКАМИ

У статті розглянуті питання побудови оптимальних діаграм швидкості руху шахтних підйомних установок. На основі принципу оптимального управління Понтрягіна розв'язується задача мінімізації витрачання енергії. Крім того, виконано розрахунки оптимальних по швидкості діаграм руху підйомних установок з урахуванням обмежень прискорення та ривку, що забезпечує зменшення коливань підйомного сосуду.

В статье рассмотрены вопросы построения оптимальных диаграм скорости движения шахтных подъемных установок. На основе принципа оптимального управления Понтрягина решается задача минимизации расхода энергии. Кроме того, сделан расчет оптимальных по быстрдействию диаграм скорости движения подъемных установок с учетом ограничения ускорения и рывка, что обеспечивает уменьшение колебаний подъемного сосуда при движении.

Problems of construction of optimal speed diagrams construction for the hoisting plant motion are considered. A problem of minimization of the motion energy on the basis of the Pontriagin principle is solved. Besides, it is realized a determination of optimal by speed diagrams of the hoisting plants taking into account a limitation by acceleration and jerk to reduce the skip vertical oscillations.

Введение. Проблема оптимизации циклов движения подъемных машин. Задачи оптимизации цикла спуска/подъема шахтных подъемных установок стали актуальными несколько десятилетий назад и продолжают быть актуальными в настоящее время. К числу первых работ в этой области можно отнести статьи [1–3]. При расчете диаграм скорости оптимизация проводилась по критериям минимума времени цикла и минимума расхода энергии. Помимо проблемы оптимизации важнейшее значение в условиях значительного износа оборудования имеет проблема обеспечения безопасности, поскольку вертикальные рывки упругого каната и возникающие при этом вертикальные колебания подъемного сосуда приводят к возникновению горизонтальных колебаний и ударов предохранительных башмаков по изношенным проводникам [4, 5]. Проблема ограничения вертикальных колебаний решается введением ограничений на величины максимальной скорости, максимальных ускорения и рывка. В настоящей работе рассматривается как задача минимизации расхода энергии, которая решается на основе принципа максимума Понтрягина [6], так и задача оптимального по времени движения с учетом указанных ограничений. Оптимальные диаграммы скорости получены для реальных параметров подъемных установок.

1. Оптимальный по расходу энергии режим движения неуравновешенной подъемной установки. Рассмотрим задачу определения оптимального режима управления неуравновешенной подъемной установкой, обеспечивающего минимальное среднеквадратическое усилие на валу барабана, т.е. минимальные энергетические потери в якоре двигателя.

Простейшее уравнение динамики неуравновешенного подъема имеет вид:

$$\ddot{x} = v, \quad \dot{x} = \frac{2px}{m} + \frac{F}{m} - \frac{kQ + pH}{m}, \quad (1)$$

где x – пройденный путь, v – скорость движения, m – масса установки, F – управляющее усилие на ободе барабана подъемной машины, k – коэффициент шахтных сопротивлений, Q – вес полезного груза, p – вес погонного метра каната, H – полная высота подъема.

Требуется найти управление $F(x)$, реализующее минимум функционала $L = \int_0^T F^2 dt$ (время T здесь не фиксировано) и переводящего систему из положения $x = v = 0$ в положение $x = H$, $v = 0$.

В соответствии с принципом максимума Понтрягина [6] вводятся вспомогательные так называемые сопряженные переменные y_1 (соответствует переменной x), y_2 (соответствует переменной v) и y_0 (соответствует функционалу L) и строится функция Гамильтона

$$H = y_1 v + y_2 \frac{F + 2px - kQ - pH}{m} + y_0 F^2$$

В результате получаем так называемую гамильтонову систему. Уравнения, описывающие изменение по времени всех переменных, в том числе и функционала L , и включающие в себя уравнения движения, имеют вид (2) и (3):

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -\frac{\partial H}{\partial x} = -r^2 y_2, \\ \dot{y}_2 = -\frac{\partial H}{\partial v} = -y_1, \\ \dot{y}_0 = -\frac{\partial H}{\partial L} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{L} = \frac{\partial H}{\partial y_1} = v, \\ \mathcal{L} = \frac{\partial H}{\partial y_2} = \frac{1}{m}(F + 2px - kQ - pH), \\ \mathcal{L} = \frac{\partial H}{\partial y_0} = F^2, \end{array} \right. \quad (3)$$

где $r^2 = \frac{2p}{m}$, $y_0 = c_0 = const$, что следует из третьего уравнения системы (2).

Введем обозначения $y_1 = \frac{Y_1}{c_0}$, $y_2 = \frac{Y_2}{c_0}$. Из первых двух уравнений

$$\frac{dy_1}{dy_2} = r^2 \frac{y_1}{y_2}, \text{ так что } y_1 = \pm \sqrt{h + r^2 y_2^2} \quad (h = const).$$

Условие оптимальности (по Понтрягину) имеет вид $\frac{\partial H}{\partial F} = 0$ [6], откуда

получим $y_2 = -2mF$; $y_1 = \pm \sqrt{h + 8mpF^2}$. Добавим условие $H = 0$, откуда

$$v = \frac{2F(kQ + pH - 2px) - F^2}{m\sqrt{h + 8mpF^2}}, \quad (4)$$

Отсюда при $v = 0$ имеем $F = 2(kQ + pH)$, $x = 0$ (начало движения) и $F = 0$, $x = H$ (окончание движения). Так как в середине подъема в некоторой точке ускорение $\frac{dv}{dt} = 0$, причем в этом случае $F = kQ + pH - 2px$, а скорость $v > 0$, то перед корнем в выражении для скорости следует выбрать знак «+», а это отвечает знаку «-» в выражении для y_1 . Подставляя полученные выражения во второе уравнение (2) и учитывая равенство $\mathcal{L} = \frac{dF}{dt} v$, получим уравнение

$$-\frac{dF}{dx} 2mF [2(kQ + pH - 2px) - F] = h + 8mpF^2$$

или

$$\frac{dx}{dF} + \frac{2mF}{h + 8mpF^2} [2(kQ + pH) - F - 4px] = 0. \quad (5)$$

Примем, что $h > 0$, тогда решение этого уравнения имеет вид:

$$\frac{x}{H} = c \frac{\sqrt{2}}{g} \sqrt{1 + g^2 u^2} + \frac{1+d}{2d} \left[1 - u + \frac{\sqrt{1 + g^2 u^2}}{g} \ln \left(\frac{\sqrt{1 + g^2 u^2} + gu}{\sqrt{1 + g^2} + g} \right) \right],$$

где $d = \frac{pH}{kQ}$, $g^2 = \frac{32mp(kQ + pH)^2}{h}$, $u = \frac{F}{2(kQ + pH)}$, g и c – произвольные постоянные, которые определяются из граничных условий в начале и конце подъема. При $x = 0$ ($u = 1$), получаем $c = 0$. При $x = H$ ($u = 0$), получаем

$$g \frac{1-d}{1+d} = \ln(\sqrt{1+g^2} + g) \text{ или } \frac{1-d}{1+d} = \frac{\text{Arsh}g}{g}.$$

Итак, окончательно оптимальное решение имеет вид:

$$x = H \frac{1+d}{2d} \left[1 - u + \frac{\sqrt{1 + g^2 u^2}}{g} (\text{Arsh}gu - \text{Arsh}g) \right]. \quad (6)$$

Нахождение решения в форме (5) позволяет построить как оптимальное управление в зависимости от пройденного пути или скорости (эта зависимость показана на рисунке 1), так и зависимость скорости подъема от времени. При расчете было принято, что

$$k = 1.15; Q = 19.6 \cdot 10^4 \text{ Н}; r = 15.8 \frac{\text{кг}}{\text{м}}; m = 21848.21 \text{ кг}; H = 869 \text{ м}.$$

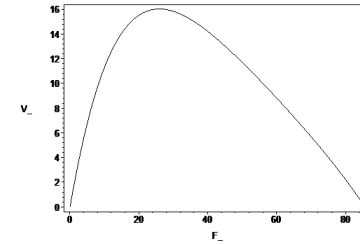


Рис.1 – Зависимость управляющей силы от скорости движения

2. Минимизация времени подъема/спуска с учетом ограничений на скорость, ускорение и рывок при движении. Минимизация времени подъема/спуска достигается реализацией движения с максимально

допустимыми ускорениями и скоростями. Заметим, что на начальном и конечном участках, при движении в направляющих кривых, допустимые значения ускорения и скорости являются значительно меньшими, чем при движении в стволе шахты. Выделим семь основных последовательных участков оптимального движения: участок разгона при движении поднимающегося и опускающегося сосудов в направляющих кривых; участок движения с максимальной допустимой скоростью в направляющих кривых; разгон с максимально допустимым ускорением вплоть до достижения максимально допустимой скорости в стволе шахты; движение с максимальной допустимой скоростью в стволе шахты; движение с максимально допустимым торможением вплоть до подхода к разгрузочным кривым; движение с максимальной допустимой скоростью в разгрузочных кривых; торможение в направляющих кривых вплоть до точки полной остановки обоих подъемных сосудов.

Однако, в точках перехода с одного участка на другой скачки ускорения и рывка (определяется как производная от ускорения) приводят к появлению больших динамических нагрузок и возникновению значительных вертикальных колебаний в канате. Это приводит к необходимости введения дополнительных переходных (сглаживающих) участков, которые позволяют существенно уменьшить эти скачки. С учетом последнего замечания окончательно вводятся следующие участки на оптимальной диаграмме движения: 1) разгон в направляющих кривых; 2) движение с максимальной скоростью в направляющих кривых вплоть до выхода из направляющих кривых опускающегося сосуда; 3) сглаживающий участок – переход к движению с максимально допустимым ускорением; 4) разгон с максимально допустимым ускорением; 5) сглаживающий участок – переход к движению с максимальной допустимой скоростью; 6) движение с максимальной допустимой скоростью; 7) сглаживающий участок – переход к движению с максимально допустимым торможением; 8) движение с максимально допустимым торможением вплоть до входа в направляющие кривые поднимающегося сосуда; 9) сглаживающий участок – переход к движению с максимальной допустимой скоростью в направляющих кривых; 10) движение с максимальной допустимой скоростью в направляющих кривых; 11) торможение в направляющих кривых вплоть до точки полной остановки подъемного сосуда.

Для того, чтобы предотвратить возникновение значительных динамических усилий в канате, вводятся нулевых условий для рывка в начале и конце каждого участка. Кроме того, должна быть обеспечена непрерывность функций пути, скорости, ускорения и рывка при переходе с одного участка на другой.

Условия:

$$1) \text{ в начале 1-го участка } x(0) = v(0) = a(0) = r(0) = 0;$$

- 2) в конце 1-го участка и в начале 2-го
 $x(t_1) = x_1; v(t_1) = v_{1\max}; a(t_1) = r(t_1) = 0;$
- 3) в конце 2-го участка и в начале 3-го
 $x(t_2) = x_2; v(t_2) = v_{1\max}; a(t_2) = r(t_2) = 0;$
- 4) в конце 3-го участка и в начале 4-го
 $x(t_3) = x_3; v(t_3) = v_3; a(t_3) = a_{\max}; r(t_3) = 0;$
- 5) в конце 4-го участка и в начале 5-го
 $x(t_4) = x_4; v(t_4) = v_4; a(t_4) = a_{\max}; r(t_4) = 0;$
- 6) в конце 5-го участка и в начале 6-го
 $x(t_5) = x_5; v(t_5) = v_{\max}; a(t_5) = r(t_5) = 0;$
- 7) в конце 6-го участка и в начале 7-го
 $x(t_6) = x_6; v(t_6) = v_{\max}; a(t_6) = r(t_6) = 0;$
- 8) в конце 7-го участка и в начале 8-го
 $x(t_7) = x_7; v(t_7) = v_7; a(t_7) = -a_{\max}; r(t_7) = 0;$
- 9) в конце 8-го участка и в начале 9-го
 $x(t_8) = x_8; v(t_8) = v_8; a(t_8) = -a_{\max}; r(t_8) = 0;$
- 10) в конце 9-го участка и в начале 10-го
 $x(t_9) = x_9; v(t_9) = v_{2\max}; a(t_9) = r(t_9) = 0;$
- 11) в конце 10-го участка и в начале 11-го
 $x(t_{10}) = x_{10}; v(t_{10}) = v_{2\max}; a(t_{10}) = r(t_{10}) = 0;$
- 12) в конце 11-го участка
 $x(t_{11}) = H; v(t_{11}) = a(t_{11}) = r(t_{11}) = 0.$

Здесь и далее r – это рывок (то есть, производная от ускорения); t_i – время движения на участке с номером i ; x_i и v_i – соответственно пройденные путь и скорость в конце участка с номером i ; H – это полная длина спуска/подъема; v_{\max} – это максимально допустимая скорость движения сосуда; $v_{1\max}$ – максимально допустимая скорость движения сосуда в направляющих кривых при разгоне; $v_{2\max}$ – максимально допустимая скорость движения в направляющих кривых при торможении; a_{\max} – максимально допустимое ускорение движения; $-a_{1\max}$ – максимально допустимое значение торможения. Величины x_i, t_i определяются в ходе решения задачи, однако x_2 – это известное расстояние, которое должен пройти сосуд в направляющих кривых при разгоне; кроме того, величина $(H - x_9)$ – это известный путь движения в направляющих кривых при торможении.

Для построения оптимальной диаграммы и удовлетворения приведенным выше условиям задаем следующие выражения зависимости пути от времени на соответствующих участках движения:

- 1) $x = a_4 t^4 + a_5 t^5 + a_6 t^6$;
- 2) $x = x_1 + v_{1\max} t$;
- 3) $x = x_2 + v_{1\max} t + b_4 t^4 + b_5 t^5$;
- 4) $x = x_3 + v_3 t + \frac{a_{\max} t^2}{2}$;
- 5) $x = x_4 + v_4 t + \frac{a_{\max} t^2}{2} + c_4 t^4 + c_5 t^5$;
- 6) $x = x_5 + v_{\max} t$;
- 7) $x = x_6 + v_{\max} t + d_4 t^4 + d_5 t^5$;
- 8) $x = x_7 + v_7 t - \frac{a_{1\max} t^2}{2}$;
- 9) $x = x_8 + v_8 t - \frac{a_{1\max} t^2}{2} + e_4 t^4 + e_5 t^5$;
- 10) $x = x_9 + v_{2\max} t$;
- 11) $x = x_{10} + v_{2\max} t + f_4 t^4 + f_5 t^5 + f_6 t^6$.

Все коэффициенты $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i, f_i$, которые присутствуют в выражениях для пути, определяются в ходе решения задачи при удовлетворении приведенным выше условиям в начале и конце каждого участка движения.

Для числового расчета задавались следующие параметры движения:

$$H = 942\text{ м}; x_2 = 5\text{ м}; H - x_9 = 11.5\text{ м}; v_{\max} = 11 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v_{1\max} = 0.6 \frac{\text{м}}{\text{с}}; v_{2\max} = 0.55 \frac{\text{м}}{\text{с}}; a_{\max} = 0.65 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}; a_{1\max} = 0.65 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Заданные параметры отвечают реальным ограничениям, которые накладываются на процесс движения техническими условиями подъема в стволе.

Далее полученное оптимальное решение сравнивается с реальными диаграммами подъема, которые реализуются на Запорожском железорудном комбинате, где установлены машинами типа БЦК с переменным радиусом навивки, эксплуатирующиеся в зоне сдвижения горных пород [7]. В настоящее время по техническим условиям скорость подъема ограничена диапазоном $10.5 - 11 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

На рисунках 2–4 приведены реальные диаграммы линейной скорости, ускорения, рывка и упругих усилий в канате. Видно, что при подъеме резкие изменения скорости и ускорения возбуждают значительные вертикальные колебания сосуда на упругом канате практически на всем цикле подъема.

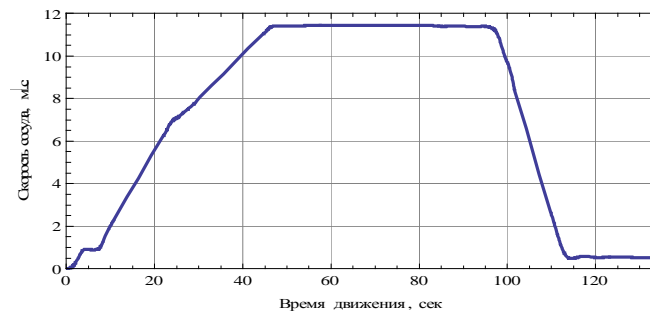


Рис.2

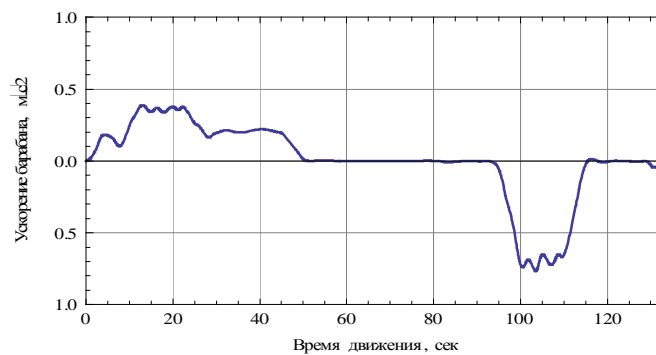


Рис.3

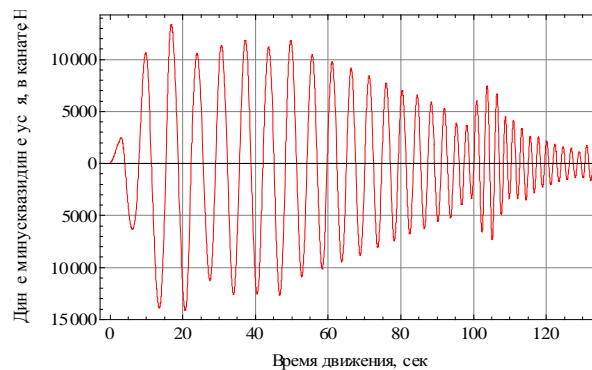


Рис.4

На рисунках 5–8 приведены оптимальные диаграммы скорости, ускорения, рывка, а также динамических нагрузок в канате.

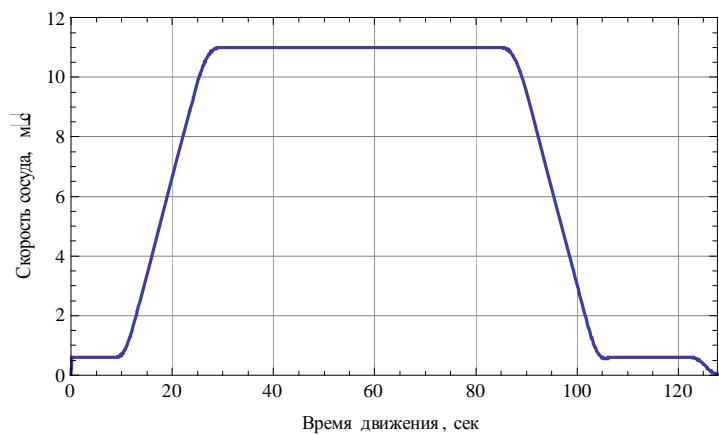


Рис. 5

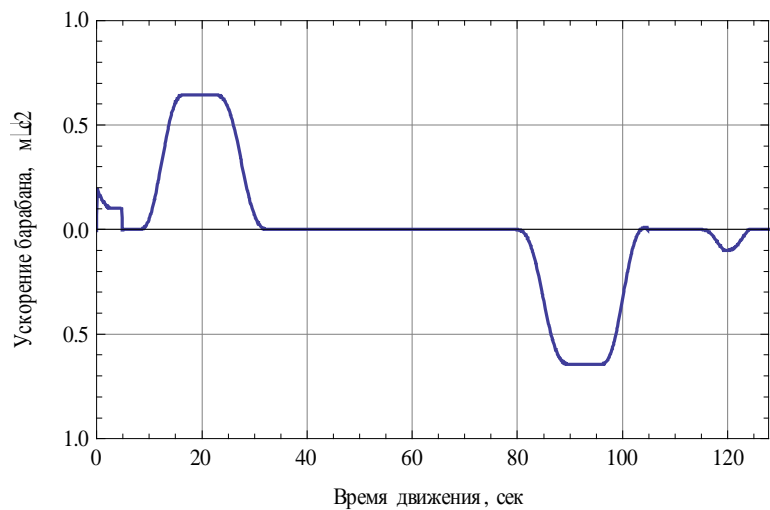


Рис. 6

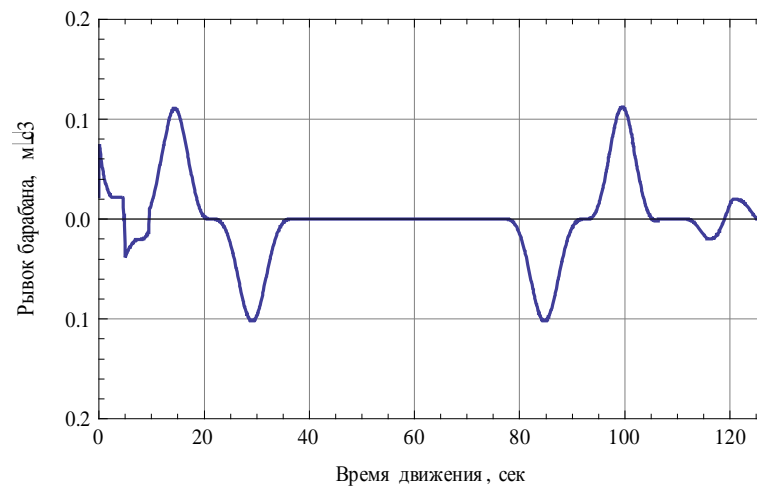


Рис. 7

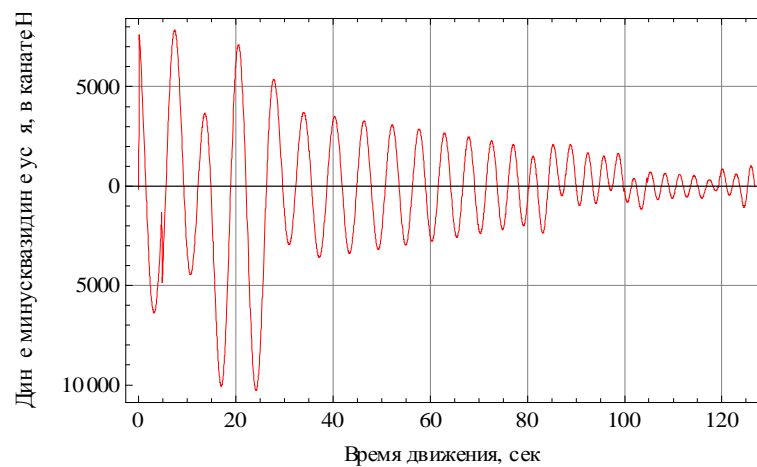


Рис. 8

По виду графиков на рисунках 5–8 видно, что при решении указанной выше задачи оптимизации время движения снизилось на 7–10 с по сравнению с фактически реализуемыми в настоящее время режимами движения, а интенсивность колебаний сосуда на упругом канате существенно уменьшилась, снижая тем самым горизонтальные нагрузки на армировку ствола. В свою очередь, снижение нагрузок до уровня ниже максимально допустимого за счет оптимизации процесса движения позволяет разрешить дальнейшее повышение скорости для увеличения производительности подъема.

Выводы. В задаче оптимизации движения шахтных подъемных установок получены диаграммы, позволяющие либо существенно уменьшить расход энергии, либо заметно уменьшить время подъема. В последнем случае удается также ограничить величины ускорения и рывка при движении подъемного сосуда, что приводит к уменьшению колебаний подъемного сосуда и каната.

Список литературы: 1. *Масляный А. С.* Оптимальная динамика статически уравновешенных подъемных установок / *А. С. Масляный* // Применение вычислительной техники и математических методов в автоматизации горнорудного и металлургического производства. – К.: Техніка. – 1968. – С. 20–29. 2. *Масляный А. С.* Оптимальная динамика статически неуравновешенных подъемных установок / *А. С. Масляный* // Применение вычислительной техники и математических методов в автоматизации горнорудного и металлургического производства. – К.: Техніка. – 1968. – С. 29–44. 3. *Масляный А. С.* Синтез оптимального управления шахтными подъемными установками / *А. С. Масляный, Ю. В. Михлин, Г. И. Малецкая* // Ордена Ленина институт кибернетики АН УССР. – К.: ПРЕПРИНТ–77–26, – 1977. – 32 с. 4. *Понтрягин Л. С.* Математическая теория оптимальных процессов / *Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе [и др.]*. – М.: Наука. – 1983. – 393 с. 5. *Ильин С. Р.* Об устойчивости движения грузов в упругих проводниках при пространственном расположении точек крепления канатов для многоканатного подъема / *С. Р. Ильин* // Publ. Techn. Univ. Heavy Ind. – Miskolc. – Ser. A – Vol. 35, Fasc. 3–4. – 1981.– P. 197–204. 6. *Ильин С. Р.* Влияние параметров диаграмм скорости вращения подъемных машин на динамические усилия в канатах и усталостные явления в элементах армировки ствола / *С. Р. Ильин* // Стальные канаты № 8. Экология. – Одесса. – 2010. – С. 56–68. 7. *Белобров В. И.* Динамика шахтных подъемных установок / *В. И. Белобров, В. А. Дзензерский, В. И. Самуся [и др.]* – Днепропетровск : Изд. Днепропетровского университета. – 2000. – 380 с.

Надійшла до редколегії 15.09.2011

УДК 62-526

В. Я. КОПИ, д-р техн. наук, проф., зав. каф. АПС СевНТУ, г. Севастополь;

Ю. А. ОСИНСКИЙ, доц. каф. АТПП СевНТУ, г. Севастополь;

О. В. ФИЛИПОВИЧ, канд. техн. наук, доц. каф. АПС СевНТУ, г. Севастополь;

М. И. ГАРМАТЮК, инженер каф. АПС СевНТУ, г. Севастополь

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ШАГОВОГО ПНЕВМОПРИВОДА ПОВОРОТНОГО ДЕЙСТВИЯ

Розглянуті структура, параметри, конструкція та основні принципи функціонування експериментальної установки для дослідження динамічних характеристик коливального крокового пневматичного приводу поворотної дії. Наведені приклади порівняння експериментальних даних з даними, які отримані в результаті моделювання динаміки приводу.

Рассмотрены структура, параметры, конструкция и основные принципы функционирования экспериментальной установки для исследования динамических характеристик колебательного шагового пневматического привода поворотного действия. Приведены примеры сравнения экспериментальных данных с данными, полученными в результате моделирования динамики привода.

The structure, parameters, design and main principles of functioning of experimental station for research of dynamic characteristics of an oscillatory step-by-step rotary pneumodrive are considered. Examples of comparison of experimental data with the data received as a result of modeling of dynamics of a drive are given.

Введение. Рассматриваемая экспериментальная установка, разработанная на кафедре автоматизированных приборных систем Севастопольского национального технического университета, предназначена для исследования динамических характеристик колебательного шагового пневматического привода поворотного действия (далее – КШПП). КШПП имеют ряд преимуществ перед другими типами пневмоприводов, осуществляющих позиционирование в большом числе фиксированных положений, например, большее число точек позиционирования и большую жесткость при фиксации достигнутого положения, а также возможность осуществления контурного управления при необходимости перемещения исполнительного органа по заданной траектории с заданной скоростью. Целью данной работы является описание конструкции и принципов функционирования установки, методики проведения исследований, а также сравнительный анализ эмпирических и теоретических результатов.

Описание принципов функционирования установки. Общий вид установки показан на рис. 1.

Установка расположена на столике, к основанию которого прикреплена массивная плита 1 для исключения воздействия различных случайных факторов (например, вибрации) на результаты измерений.

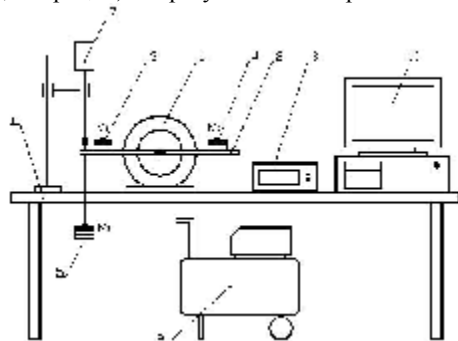


Рис. 1 – Общий вид установки

На плите установлен КШПП 1, к выходному валу которого прикреплен шкив с планкой 2 для установки грузов 3, 4, 5 различной массы. Грузами 3 и 4 равной массы $M_1 = M_2$ осуществляется регулировка момента инерции системы без увеличения момента сопротивления, который остается неизменным. Груз 5 массой M_3 , расположенный от оси вращения на определенном расстоянии (плече), предназначен также и для изменения момента сопротивления. На определенном расстоянии от центра выставлен измерительный наконечник растрового преобразователя 7, установленного в стойке и производящего измерения перемещений выходного вала привода. Питание системы сжатым воздухом и задание требуемой величины давления в магистрали осуществляется переносной пневматической системой 9, включающей компрессор, блок подготовки воздуха и ресивер. Блок 8, состоящий из двух частей, является комплексной системой управления и обработки результатов измерения. Первая его часть – программируемый микроконтроллер (МК) серии BC440, предназначенный для осуществления управления мембранными приводами КШПП как в непрерывном, так и в ручном пошаговом режимах. Основным элементом второй части (счетного устройства) является 8-разрядный высокопроизводительный микроконтроллер ATmega8, к которому присоединяется растровый преобразователь и кнопки управления. Подготовленные данные передаются на персональный компьютер (ПК) 10 по последовательному интерфейсу RS232, при этом формируется текстовый файл результатов.

Для управления процессами преобразования и записи информации предусмотрены кнопки «Сброс» и «Запись». При нажатии на кнопку «Сброс» происходит запуск счетчика в режиме ожидания. При нажатии на кнопку «Запись» МК выдает подготовленные данные на ПК. Обработка эксперимен-

тальных данных, в частности, преобразование линейного перемещения штока преобразователя 7 в угловую величину поворота ведомого вала привода, осуществляется в среде Maple.

Конструкция КШПП представлена на рис. 2 [1].

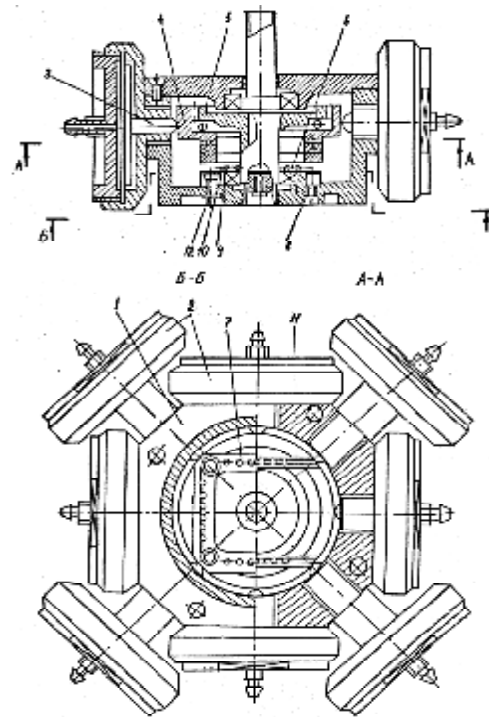


Рис. 2 – Конструкция КШПП

Он состоит из корпуса 1 с восемью мембранными приводами 2, расположенными под углом 45° относительно друг друга. Штоки 3 приводов 2 контактируют с шестерней внутреннего зацепления 4, выполняющей роль ведущего элемента. В свою очередь шестерня 4 находится в зацеплении с валом-шестерней 5, установленной в подшипниковых опорах 6. В отличие от волновой передачи, ведущий элемент выполнен жестким, а аналогия этих передач прослеживается в том, что шестерня 4 может совершать только плоскопараллельные круговые колебания. От проворота вокруг собственной оси она фиксируется крестообразной муфтой 7 и прижимной планкой 8 через шарики 9, которые расположены в сепараторах 10 и 11. Люфт всей системы выбирается за счет затяжных винтов 12.

Последовательной подачей воздуха в приводы 2 обеспечиваются плоскопараллельные круговые колебания шестерни 4, преобразующиеся во вращение вала-шестерни 5 вокруг собственной оси.

Теоретический анализ динамических характеристик КШПП. Контакт ведущего и ведомого элементов происходит по двум точкам. При совершении ведущим элементом под действием сил, создаваемых пневмоприводами, плоскопараллельных круговых колебаний за счет контакта в одной из точек ведомый элемент поворачивается на угол g . При совершении одного полного круга колебаний ведущего элемента ведомый элемент поворачивается на

угол $g^{ок} = \frac{z_1 - z_2}{z_1} 2p$, где z_1 и z_2 – числа зубьев ведущего и ведомого колес

соответственно. Диаметр d окружности колебаний ведущего элемента равен $d = 2r$ и соответствует максимальному зазору между ведущим и ведомым элементами, причем $d = D_1 - D_2 = (z_1 - z_2)m_z$. Делительные диаметры ведущего и ведомого элементов равны: $D_1 = z_1 m_z$, $D_2 = z_2 m_z$, где m_z – модуль зацепления. Коэффициент передачи i определяется соотношением

$i = \frac{g^{ок}}{x_i^{ок}} = \frac{2}{D_2}$, где $x_i^{ок}$ – длина окружности колебаний ведущего элемента равная

$x_i^{ок} = p d = p(z_1 - z_2)m_z$.

Теоретические динамические характеристики КШПП оценивались при помощи уравнения движения, выведенного на основании уравнения Лагранжа второго рода, и подробно приведенного в [2]. Из-за ограниченности объема статьи вывод здесь не приводится. Окончательно это уравнение имеет вид:

$$\mathfrak{D} \left[m_1 + \frac{J i^2}{I - K} \right] = F_{t\text{рез}} - \frac{M_c i}{I - K},$$

где $K = \frac{(tgf_1 + tgf_2) f}{(f + tgf_2) tgf_1}$ (элементы, входящие в данную формулу, определены

в [2]), \mathfrak{D} – вторая производная центрального угла a , определяющего величину смещения ведущего элемента относительно исходного положения; m_1 – масса ведущего элемента; r – радиус окружности колебаний ведущего элемента, соответствующий половине максимального зазора между ведущим и ведомым элементами; J – момент инерции выходного вала с присоединенными к нему элементами; M_c – момент сопротивления, действующий на выходном валу ($M_c = m_z \cdot b, m_z = M_3$, b – плечо); $F_{t\text{рез}}(a)$ – результирующая сила, действующая в направлении движения ведущего элемента.

Результирующая сила $F_{t\text{рез}}(a)$ зависит от величины текущего угла поворота ведущего элемента и в общем случае определяется из выражения

$$F_{t\text{рез}} = F_{t\text{рез}} + F_{mp\Sigma}^{x_i},$$

где F_t – сила, создаваемая пневмоприводами и действующая в направлении движения ведущего элемента; $F_{mp\Sigma}^{x_i}$ – суммарная сила трения, также действующая в направлении противоположном движению ведущего элемента (в выражение для определения данной силы входит коэффициент трения f_p , создаваемого при взаимодействии штоков мембранных приводов и ведущим элементом).

Подробный вывод выражений для определения F_t и $F_{mp\Sigma}^{x_i}$ при различных законах управления и, следовательно, при различных вариантах перемещений, приведен в [2]. Кроме этого следует отметить, что при моделировании динамики КШПП учитывались термодинамические процессы в мембранных пневмоприводах, создающих усилие F_t , и инерционность коммутирующей аппаратуры.

Сравнение теоретических и экспериментальных данных. Приведем примеры сравнения динамических характеристик КШПП, полученных в результате численного решения уравнения движения и эмпирических, полученных по результатам опытных данных на рассматриваемой установке. Рассматриваются два возможных случая перемещения ведущего элемента привода (на $22,5^0$ и 45^0), динамические характеристики определяются на одном шаге при одинаковых значениях исходных данных, указанных в таблице 1. Исходные данные, значения которых варьируются в зависимости от номера эксперимента, приведены в таблице 2.

Из всего множества проведенных в статье приведены результаты 6 экспериментов, которые в дальнейшем различаются по номерам. Для всех случаев шток измерительного преобразователя устанавливался на расстояние, равное 0,02 м от оси вращения выходного вала КШПП. Примеры, показывающие зависимости угла поворота ведомого элемента КШПП от времени ($g = g(t)$), полученные путем теоретических и экспериментальных исследований для различных вариантов исходных данных, приведены на рис. 3.

Отметим, что перемещение на $22,5^0$ проводилось из состояния, при котором включен один мембранный привод в состояние, при котором включены два соседних привода одновременно. При перемещении на 45^0 из использовалось переключение двух соседних мембранных приводов.

Таблица 1 – Исходные данные для проведения экспериментальных и теоретических исследований

№ п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1.	Коэффициенты трения (зацепление f /привода f_p)	0,08/0,05
2.	Числа зубьев ведущего z_1 / ведомого z_2 колес	158/150
3.	Модуль зацепления m_z , мм	0,0003
4.	Масса ведущего элемента m_1 , кг	0,522
5.	Собственный момент инерции ведомого элемента J_2 , Н·м ² ;	0,00128
6.	Магистральное давление P_M , МПа	0,6
7.	Абсолютная температура T , К	290
8.	Коэффициенты расхода μ_1 / μ_2	0,6/0,2
9.	Диаметры проходных сечений подходящих магистралей $d_1 = d_2$, м	0,0015
10.	Эффективные площади мембран пневмоприводов $S_1 = S_2$, м ²	0,022
11.	Максимальный ход штоков мембранных пневмоприводов x_{sum} , м	0,0006
12.	Координаты, определяющие холостые объемы пневмоприводов $x_{01} = x_{02}$, м	0,004
13.	Постоянные времени срабатываний коммуникационной аппаратуры $t_1 = t_2$, с	0,0033

Рисунок 1 — Структурная схема системы регулирования частоты

Таблица 2 – Варьируемые исходные данные

№ п/п	Наименование параметра	Номер эксперимента					
		1	2	3	4	5	6
1.	Перемещение ведущего элемента, град	22,5	22,5	22,5	45	45	45
2.	Плечо (расстояние, на котором подвешен груз от центра вращения), b , м	0,1	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15
3.	Масса груза, $m_2 = M_3$, кг	0,34	0,34	0,17	0,34	0,17	0,64

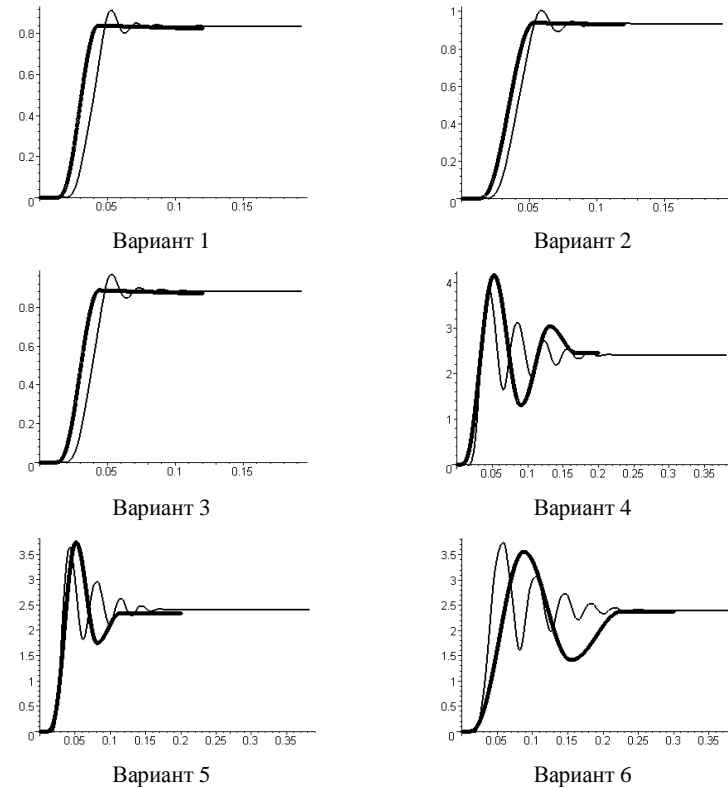


Рис. 3 – Графики зависимости угла поворота ведомого элемента от времени: — экспериментальные исследования; — теоретические исследования

Выводы. Сравнение результатов и экспериментальных исследований показывает, что при оценке времени перемещения в конечную точку наибольшее рассогласование теоретических и экспериментальных результатов составляет 18,9%, что вполне удовлетворительно для пневмоприводов. Средняя погрешность по времени перемещения составляет 11%.

Перспективами дальнейших исследований в данной области являются исследования управляемого движения выходного вала КШПП по оптимальному закону.

Список литературы: 1. *Konn В. Я.* Пневматические модульные манипуляторы в сборочном производстве / *В. Я. Konn* // Машиностроительное производство. Сер. Автоматизация производства, гибкие производственные системы, робототехника. – М.: ВНИИТУЭМП, 1989. – Вып. 1. – С. 52. 2. *Konn В. Я.* Колебательные шаговые пневмоприводы / *В. Я. Konn, Ю. А. Осинский,*

УДК 519.246.8

Т. С. ПЕТРУНИНА, студент, НТУ «ХПИ»

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ СВОЙСТВ ХАОТИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

При анализе хаотических временных рядов возникает проблема выявления и анализа их структурных свойств. Для решения задачи численного анализа структурных свойств исследуемых временных рядов применен метод Херста и метод сингулярного структурного анализа.

При аналізі хаотичних часових рядів виникає проблема виявлення структурних властивостей випадкового процесу. Для вирішення задачі аналізу властивостей хаотичних часових рядів застосований метод Херста та метод сингулярного структурного аналізу.

In the process of chaotic time series analysis, there arises a problem of detecting and analysis of their structural properties. Hurst exponent method and singular structural analysis method are used to solve the problem of analysis of structural of investigated properties chaotic time series.

Введение. Решение основных задач анализа временных рядов, а именно, их идентификации и прогнозирования, требует предварительного анализа структуры временного ряда с целью выбора его подходящей математической модели. Несмотря на наличие большого числа типовых моделей временных рядов, таких как «тренд + шум», модели авторегрессии – скользящего среднего и других, выбор адекватной модели остается достаточно сложной и плохо формализуемой задачей. Поэтому на первом этапе анализа целесообразно установить характер временного ряда, а именно, является ли он стохастическим или хаотическим, определить с моделью тренда, и, в первую очередь, выявить наличие колебательных составляющих, проанализировать свойства ряда остатков. Подобная методика может быть использована и для обнаружения моментов изменения свойств временного ряда, например, изменения структуры модели.

Постановка задачи. Целью настоящей работы является анализ свойств временных рядов на основе использования показателя Херста и анализ структурных свойств временных рядов с использованием метода сингулярного спектрального анализа. В качестве объекта исследования использованы модельные и реальные временные ряды данных энергопотребления.

Анализ структуры временного ряда методом Херста. Показатель Херста часто используется для разделения стохастических и хаотических временных рядов [1]. Вычисления показателя Херста позволяют также оценить среднюю длину цикла временного ряда, под которой понимается интервал времени, по истечении которого исчезает влияние начальных условий.

Показатель Херста H характеризует отношение силы тренда (детерминированный фактор) к уровню шума (случайный фактор). При проведении анализа используют следующие условия, позволяющие оценить характер временного ряда [2].

Значение $H = 0.5$ соответствует полностью случайному временному ряду, аналогичному случайным смещениям частицы при классическом броуновском движении.

Случай $H \in (0.5, 1]$ соответствует процессу с долгосрочными эффектами, характеризующийся существенной зависимостью от начальных условий. Такой ряд называется персистентным.

При $H \in [0, 0.5)$ процесс обладает короткой памятью (краткосрочные эффекты) и представляет собой процесс детерминированного хаоса. Такой временной ряд называется антиперсистентным.

Пример 1. Вычисление показателя Херста для временного ряда, который описывается авторегрессионным уравнением вида

$$X_k = a \cdot X_{k-1} + (1-a) \cdot X_{k-1}, \quad (1)$$

где a – параметр авторегрессионного уравнения ($0 \leq a \leq 1$),

$X_0 = 0.1$ – начальное значение авторегрессионного уравнения,

$N = 100$ – количество значений временного ряда,

$k \in [0; N-1]$ – номер значения временного ряда,

$\xi \sim N(0, \sigma^2)$ – вектор N независимых случайных чисел, каждое из

которых имеет нормальное распределение, где σ^2 – дисперсия.

Уравнение (1) приведено к стандартизированному виду.

Проведение нескольких серий испытаний для выявления зависимости показателя Херста от изменения параметра авторегрессионного уравнения a . Построение семейства графиков, которые отражают изменение параметра $a = 0.2$, $a = 0.5$ и $a = 0.7$ при постоянном значении дисперсии $\sigma^2 = 10$. Результаты расчетов по вычислению показателя Херста представлены на рис. 1

Приведенный авторегрессионный временной ряд является стохастическим. С увеличением параметра a ($0 \leq a \leq 1$) степень хаотичности временного ряда уменьшается.

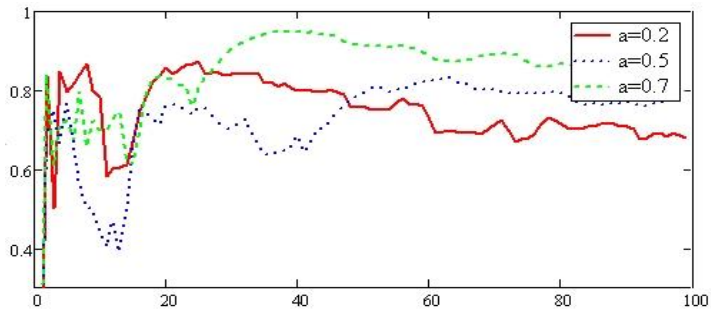


Рисунок 1 – Показатель Херста для временного ряда, который описывается авторегрессионными уравнениями, со значениями параметра $a = 0.2$, $a = 0.5$ и $a = 0.7$ и дисперсией $S^2 = 10$

Пример 2. Вычисление показателя Херста для временного ряда энергопотребления. Для исследования взята выборка энергопотребления одного из районов г. Харькова за период с 01.01.1997 по 30.09.1999 и с 21.07.2000 по 31.12.2000. Ряд значений посуточного потребления электроэнергии приведен на рис. 2.

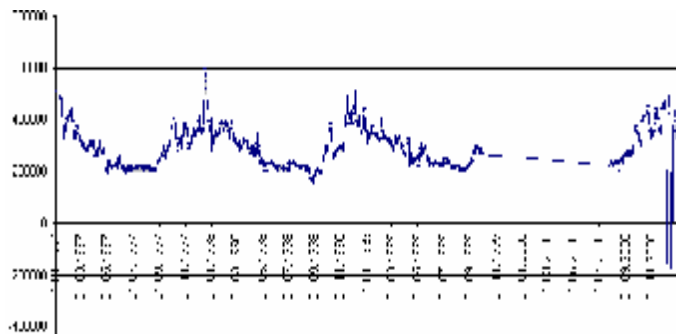


Рисунок 2 – Временной ряд энергопотребления

Графическое представление изменения показателя Херста для временного ряда энергопотребления представлено на рис. 3.

Исследование временного ряда энергопотребления методом Херста показало, что во временном ряде присутствует хаотичность, особенно выраженная в конце рассматриваемого периода.

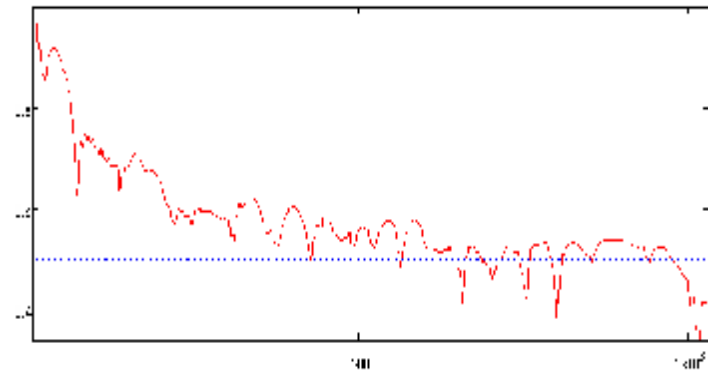


Рисунок 3 – Показатель Херста для временного ряда энергопотребления

Анализ структуры временного ряда методом сингулярного структурного анализа (методом «Гусеница»). Метод сингулярного структурного (спектрального) анализа позволяет выделить колебательные составляющие в структуре временного ряда даже в том случае, когда они не являются периодическими. В основе этого метода лежит трансформация ряда специальным образом в построенную «траекторную» матрицу и ее сингулярное разложение. При этом осуществляется выделение структурных компонент временного ряда и оценка их значимости, далее осуществляется их группировка, приводящая к разложению исходного ряда на аддитивные компоненты, такие как тренд, колебания (периодики) и шум [3]. Последним этапом является построение сглаженной модели исследуемого временного ряда (восстановление) путем сложения выделенных значимых компонент.

Пример 3. Исходный временной ряд энергопотребления (Time Series) и восстановленный временной ряд (Reconstructed series) приведены на рис. 4



Рисунок 4 – Исходный временной ряд энергопотребления и восстановленный методом «Гусеница» временной ряд энергопотребления

На рис. 4 видно, что выполнено сглаживание исходного временного ряда, имеющего ярко выраженный колебательный, но неперiodический характер. На рис. 5 представлен ряд остатков после извлечения основной структурной компоненты.

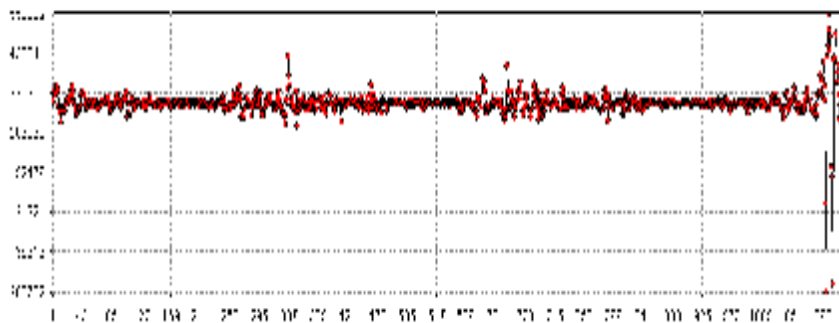


Рисунок 5 – Ряд остатков после извлечения структурной компоненты

Таким образом, в исходном временном ряде был выделен колебательный тренд, путем извлечения шума, не влияющего на характер временного ряда в будущем.

Выводы. Применение методов структурного анализа временных рядов позволяет обоснованно подойти к выбору модели временного ряда и выделить его основные структурные составляющие.

Вычисление значения показателя Херста для временного ряда позволяет определить является он хаотическим ($0 \leq H < 0.5$) или стохастическим ($0.5 \leq H \leq 1$).

Результатом применения метода «Гусеница» является разложение временного ряда на простые компоненты: медленные тренды, сезонные и другие периодические или колебательные составляющие, а также шумовые компоненты.

Список литературы: 1. Калущ Ю. А. Показатель Херста и его скрытые свойства / Ю. А. Калущ, В. М. Логинов // Сибирский журнал индустриальной математики – 2002. Том V, № 4 (12). – С. 29–37. 2. Короленко П. В. Новационные методы анализа стохастических процессов и структур в оптике. Фрактальные и мультифрактальные методы, вейвлет-преобразования. / П. В. Короленко, М. С. Маганова, А. В. Меснянкин // Уч. пос. – М.: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына, 2004. – С. 28–30. 3. Н. Э. Голяндина. «Метод «Гусеница» - SSA: анализ временных рядов» / Уч. пос. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2004. – 76 с.

Надійшла до редколегії 16.06.2011

УДК 629

Н. Е. ХАЦЬКО, аспирант каф. СПУ НТУ «ХПИ»

ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Пропонується метод ідентифікації конструктивних параметрів літального апарату на засадах адаптаційного підходу при русі за умов сталого горизонтального польоту.

Предлагается метод идентификации конструктивных параметров летательного аппарата на основе адаптационного подхода при описании опорного движения.

On the base of adaptation approach under condition of stationary level flight a method of the constructive parameters of flying vehicle identification have been proposed.

Введение. В современных научно-технических исследованиях вычислительный эксперимент играет ведущую роль при проектировании и изучении сложных технических систем. Одним из основных этапов вычислительного эксперимента, в соответствии с методологией Глушкова В. М. [1], является построение математических моделей, адекватных физическим процессам в технических системах. Движение материальной точки, как физический процесс, всегда рассматривается в рамках некоторой системы координат, от типа которой зависит вид математической модели движения. Наравне с математической моделью для моделирования движения летательного аппарата важным является как можно более точное описание его конструктивных параметров и аэродинамических характеристик.

Для приближения научных исследований к возможности практического применения в качестве экспериментального объекта выбрано моделирование движения современного тяжелого транспортного самолета Ил-96-300 российского производителя, используемого также и в Украине.

В открытых источниках, публикуемых производителем, можно найти описание основных параметров изделия, таких как максимальный расход топлива, максимальная сила тяги двигателей, размах крыла и другие параметры. Более подробное описание аэродинамических параметров самолета найти не представляется возможным из-за отсутствия информации. Однако, как будет показано далее, такая информация оказывается необходимой для описания модели движения самолета. Таким образом, возникает задача доопределения конструктивных параметров. В статье предлагается метод оценки требуемых величин, использующий в качестве опорного движения установившийся горизонтальный полет.

Модель движения летательного аппарата. Традиционно движение самолета рассматривается в траекторной системе координат, что объясняется

простотой выражений при рассмотрении проекций сил, действующих на самолет и приложенных к его центру масс.

Траекторная система координат относится к подвижным системам координат (СК). Ее начало лежит в центре масс самолета, ось OX направлена по вектору земной скорости самолета \vec{v} , ось OY лежит в вертикальной плоскости, проходящей через ось OX и направлена обычно вверх от поверхности Земли [2]; ось OZ образует с осями OX и OY правую систему координат. Положение траекторной СК относительно сопровождающего трехгранника определяется двумя углами – углом наклона траектории θ и углом пути φ . В любую модель движения ЛА входят наравне с динамическими уравнениями кинематические, что позволяет исследовать движение в различных плоскостях. В качестве опорного движения для исследования выбирается движение в вертикальной или горизонтальной плоскости [3, с. 162].

Уравнения движения получены из второго закона Ньютона путем проектирования вектора абсолютного ускорения центра масс и действующих на объект сил на оси траекторной СК [4]:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= g \left(\frac{P \cos(a + a_p) - X}{mg} - \sin q \right) \\ \ddot{y} &= \frac{g}{V} \left(\frac{P \sin(a + a_p) + Y}{mg} \cos g - \cos q \right) \\ \ddot{z} &= \frac{g}{V \cos q} \cdot \frac{P \sin(a + a_p) + Y}{mg} \cdot \sin g, \end{aligned} \quad (1)$$

где V – модуль земной скорости, P – сила тяги, X – сила лобового сопротивления, Y – аэродинамическая подъемная сила, a – угол атаки крыла, a_p – в общем случае известный установочный угол оси двигателя по отношению к продольной оси ЛА, остающийся постоянным для выбранного типа ЛА. В формулах (1) учитывается принятый в авиации способ отсчета угла пути – положительным считается поворот слева направо от первоначально выбранного направления.

Аэродинамика объекта в траекторной СК при отсутствии ветра выражена двумя составляющими – силой лобового сопротивления X и аэродинамической подъемной силой Y , которые определяются, как [5]

$$X = C_x \frac{\rho V^2}{2} S_{op}, \quad Y = C_y \frac{\rho V^2}{2} S_{op}, \quad (2)$$

где C_x – коэффициент лобового сопротивления, C_y – коэффициент подъемной силы, ρ – плотность воздуха, S_{op} – площадь поверхности ЛА, омываемая потоком (иначе – характерная площадь, за которую обычно принимают для

самолетов площадь проекции крыла на базовую плоскость крыла с подфюзеляжной частью [6, с. 110]).

Физический смысл коэффициентов аэродинамических сил заключается в том, что тела, имеющие одинаковую форму (при разных линейных размерах), взаимодействуют с набегающим потоком воздуха одинаково. Можно сказать, что полный коэффициент полной аэродинамической силы равен самой аэродинамической силе при продувке тела некоего единичного размера воздушным потоком единичной интенсивности. Практически, эти коэффициенты позволяют исследовать характеристики ЛА на уменьшенных моделях в условиях опытной установки, а затем использовать их в аэродинамических расчетах реального изделия. Таким образом, в модели движения присутствуют величины, определяемые экспериментально, что усложняет их применение в моделировании.

Согласно теории Жуковского в условиях безотрывного обтекания крыла зависимость коэффициента C_y от угла атаки линейна и определяется, как

$$C_y = 2 \cdot \frac{\rho \cdot l^2}{l^2 - 2S_{кр}} \cdot (a - a_0), \quad (3)$$

где a_0 – угол атаки для нулевой подъемной силы (на этом угле атаки возможно только вертикальное движение самолета вниз, так как подъемная сила равна нулю), l – размах крыла, $S_{кр}$ – площадь поверхности крыла. Определив коэффициент подъемной силы, перейдем к рассмотрению его взаимосвязи с коэффициентом лобового сопротивления.

В конструкторской практике после проведения аэродинамических испытаний и определения зависимости аэродинамических коэффициентов от величины угла атаки строятся поляры – графики зависимости коэффициентов C_y от C_x в диапазоне летных углов атаки. Поляра характеризует такую зависимость в ограниченном диапазоне скоростей, поэтому каждому числу Маха полета соответствует своя поляра, и каждая точка полученного графика соответствует определенному углу атаки.

В тех случаях, когда данных об аэродинамических характеристиках не хватает, приходится задавать истинные табличные зависимости приближенными интерполяционными выражениями. Проведя аппроксимацию поляры полиномиальной зависимостью $C_x(C_y)$, дополним описание модели движения ЛА. Степень полинома влияет на точность оценки коэффициента лобового сопротивления, но для приближенных расчетов можно использовать линейную зависимость:

$$C_x(C_y) = a_0 + a_1 C_y. \quad (4)$$

Таким образом, основные выражения, образующие модель динамики полета самолета следующие:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\alpha} &= g \left(\frac{P \cos(a + a_p) - X}{mg} - \sin q \right), \\ \dot{q} &= \frac{g}{V} \left(\frac{P \sin(a + a_p) + Y}{mg} \cos g - \cos q \right), \\ \dot{\beta} &= \frac{g}{V \cos q} \left(\frac{P \sin(a + a_p) + Y}{mg} \sin g \right), \\ X &= C_x \frac{rV^2}{2} S_{op}, \\ Y &= C_y \frac{rV^2}{2} S_{op}, \\ C_y &= 2 \frac{P \cdot l^2}{l^2 - 2S_{sp}} (a - a_0), \\ C_x &= a_0 + a_1 C_y. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

где m – масса ЛА, S_{sp} – площадь поверхности крыла, l – размах крыла.

Опорный режим идентификации. Из открытых источников известны основные параметры самолета ИЛ-96-300: m – масса ЛА 117000 кг, S_{sp} – площадь поверхности крыла 350 м^2 , l – размах крыла 57,66 м. Наряду с этим в литературе не указаны необходимые для расчетов конструктивные параметры: площадь обтекаемой поверхности ЛА S_{op} , угол установки двигателей a_p , угол атаки нулевой подъемной силы a_0 .

Также производители всегда указывают параметры крейсерского режима полета. Для выбранного типа самолета это: высота – 11000 м, путевая скорость – 241 м/с, тяга двигателей – 3 500 кгс. Крейсерский полет – это полет на постоянной высоте с постоянной скоростью и наименьшим километровым расходом топлива. Такой режим используют для совершения полетов по установленным маршрутам и самолеты выбранного типа чаще всего совершают движение именно в названном режиме. Высота при таком полете в общем случае может увеличиваться по мере уменьшения массы самолета за счет расхода топлива. Ограничим время движения 600 секундами, что, при удельном расходе топлива 0,595 кг/кгс·час, не вызывает значительного уменьшения общей массы ЛА. Следовательно, примем на всем протяжении пути величину тяги двигателей, высоты и угла атаки постоянными.

В установившемся горизонтальном полете с постоянной скоростью значение угла наклона траектории остается постоянным и равным нулю – $\dot{\alpha} = 0$, $q = 0$, так как кривизна траектории в вертикальной плоскости отсутствует. Угол пути и модуль скорости не изменяются $\dot{\beta} = 0$, $\dot{j} = 0$. Угол атаки a близок к нулевому значению, так как подъемная сила в данном режиме создается за счет угла установки двигателей a_p . Угол нулевой подъемной силы в (3) приравняем углу установки двигателей, взятым с

обратным знаком, так как вертикальное движение вниз с нулевой подъемной силой без сваливания в штопор является частным случаем планирования. Угол установки двигателей у современных самолетов около 2–3 градусов, что, из-за его малости, дает возможность заменить его синусом.

В этих условиях уравнения движения (5) принимают вид:

$$\left\{ \begin{aligned} P \cos a_p &= X, \\ P \sin a_p + Y &= mg, \\ X &= C_x \frac{rV^2}{2} S_{op}, \\ Y &= C_y \frac{rV^2}{2} S_{op}, \\ C_y &= -2 \frac{P \cdot l^2}{l^2 - 2S_{sp}} \sin a_p, \\ C_x &= a_0 + a_1 C_y. \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где неизвестными остаются два параметра – S_{op} , a_p . Решив систему относительно этих величин, получили:

$$S_{op} = 386,5 \text{ м}^2, \quad a_p = 2,5^\circ. \quad (7)$$

Используя полученные значения возможно моделирование характерных движений в других плоскостях и с другими параметрами траекторной СК.

Вывод. Таким образом, для идентификации неизвестных конструктивных параметров выбранной модели ЛА применен метод адаптации с использованием крейсерского режима полета. Модель (3) в условиях опорного движения в горизонтальной плоскости превращается из системы дифференциальных уравнений в алгебраическую систему, которая и характеризует установившийся горизонтальный полет с постоянной скоростью. Так как параметры крейсерского режима всегда публикуются в открытом доступе, то данный метод можно применить для любого типа самолетов.

Список литературы: 1. Глушков В. М. Фундаментальные исследования и технология программирования: Учебник. – Д.: АРЕ-Пресс, 2004. – 544 с. 2. ГОСТ 20058—80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 52 с. 3. Николаев Л. Ф. Аэродинамика и динамика полета транспортных самолетов. М.: Транспорт, 1990. – 392 с. 4. Красовский А. А.. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. – М.: Наука, 1973. – 560 с. 5. Аронин Г. С. Практическая аэродинамика: учебник для летного состава. – М.: Воениздат. 1962. – 384 с. 6. Микеладзе В. Г., Титов В. М. Основные геометрические и аэродинамические характеристики самолетов и ракет: Справочник. – М.: Машиностроение, 1982. – 149 с.

Поступила в редакцию 05.05.2011

И. А. БАГМУТ, ст. препод. каф. СПУ НТУ «ХПИ»

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНЕРЦИАЛЬНОГО БЛОКА ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Представлені результати моделювання процесу оцінювання інструментальних похибок інерціального блоку інтегрованої навігаційної системи повітряного літального апарату у різних умовах її функціонування. Запропоновано рекомендації, що дозволяють знизити помилки функціонування навігаційної системи за рахунок підвищення точності оцінювання похибок її інерціального блоку.

Представлены результаты моделирования процесса оценивания инструментальных погрешностей инерциального блока интегрированной навигационной системы воздушного летательного аппарата в различных условиях ее функционирования. Предложены рекомендации, позволяющие снизить ошибки функционирования навигационной системы за счет повышения точности оценивания погрешностей ее инерциального блока.

The results of modeling process estimation of instrument errors of inertial unit in the integrated navigation system of aircraft under various conditions of its functioning were presented. The recommendations to reduce the errors of functioning navigational system by raising the accuracy of estimating the errors of its inertial unit were proposed.

Введение. Интегрированные инерциально-спутниковые навигационные системы (ИИСНС) сегодня являются одними из наиболее перспективных систем, позволяющих определять координаты, вектор скорости и другие параметры движения воздушных летательных аппаратов (ВЛА) [1]. Такие системы основаны на комплексировании измерений поступающих от инерциальных навигационных систем (ИНС) и спутниковых навигационных систем.

Одним из центральных элементов программно-математического обеспечения ИИСНС является алгоритм оценивания инструментальных погрешностей (ИП) инерциального блока (ИБ) навигационной системы, который, как правило реализуют на основе фильтра Калмана [2]. Точность оценивания погрешностей ИБ определяет величину ошибок вычисления навигационной системой параметров движения ВЛА в условиях отсутствия спутниковых сигналов. Поэтому решение задачи повышения точности оценивания инструментальных погрешностей инерциального блока в ИИСНС является актуальным. На точность оценивания влияет ряд факторов, среди которых можно выделить следующие: настройка фильтра Калмана [3] и маневры выполняемые ВЛА [4]. В данной работе представлены результаты анализа совокупного влияния данных факторов на точность оценивания инструментальных погрешностей ИБ в ИИСНС и сформулированы рекомендации по ее повышению.

Анализ последних исследований и публикаций. Научные публикации посвященные анализу совокупного влияния настройки ФК и типов маневров выполняемых ВЛА на точность оценивания инструментальных погрешностей ИБ интегрированной навигационной системы практически отсутствуют. Стоит отметить работу [3], в которой представлены результаты исследования настройки фильтра Калмана на эффективность оценивания ИП инерциальных датчиков. Однако в этой работе использована упрощенная стационарная "одноканальная" модель ошибок инерциальной навигации, тогда как на практике, как правило, применяют более полные нестационарные модели.

Изложение материала. Для исследования совокупного влияния настройки фильтра Калмана и различных маневров ВЛА на точность оценивания инструментальных погрешностей проведена серия численных экспериментов. В основу стратегии проведения экспериментов положены выводы, сделанные на основе анализа работ [3, 4]:

1. В целом худшие условия для наблюдаемости создают стоянка и равномерное прямолинейное движение ВЛА, в этом случае наблюдаемыми являются только ошибки измерений вертикальных гироскопа и акселерометра. Более благоприятные условия обеспечивают маневры прямолинейного равноускоренного движения и набора высоты. Лучшие условия для наблюдаемости ошибок навигационной системы создают маневры с поворотом по углу курса, в этом случае наблюдаются все ошибки измерений ИБ.
2. При разработке алгоритмов оценивания ошибок навигационной системы на основе фильтра Калмана целесообразно использовать отличную от "теоретической" настройку фильтра. Под теоретической настройкой понимается использование матрицы возмущающих шумов Q , матрицы измерительных шумов R , а также начального значения матрицы ковариаций ошибок оценивания P соответствующих характеристикам фактически действующих шумов в системе и фактическим интервалам неопределенности исходных значений оцениваемых параметров. Значение матрицы возмущающих шумов Q рекомендуется понизить в несколько раз относительно ее теоретического значения, значение матрицы измерительных шумов R рекомендуется повысить в несколько раз относительно ее теоретического значения. В этом случае повысится точность оценивания вектора ошибок навигационной системы.

Условия проведения вычислительных экспериментов следующие:

1. Моделировалось функционирование ИИСНС в интегрированном режиме в течение 2050 сек., с временным отсутствием спутникового сигнала на интервале 1000–1600 сек. Комплексирование информации в ИИСНС реализованы на основе слабосвязанной схемы с обратной связью по оценкам ИП и ошибкам навигационных параметров

формируемых ИНС [2]. В качестве блока формирования корректирующих сигналов ИНС используется алгоритм калмановской фильтрации. Вектор состояния фильтра Калмана содержит ошибки навигационных параметров ВЛА, а также оценки инструментальных погрешностей ИБ, подлежащих коррекции.

2. Навигационные данные для моделирования сгенерированы с помощью имитационной модели движения [5] на основе двух программ полета ВЛА, параметры которых представлены на рис. 1, 2.
3. Принято, что в инерциальном блоке ИИСНС находится тройка ортогонально расположенных гироскопов (ГС) и тройка ортогонально расположенных акселерометров (АК). Оси чувствительности датчиков совпадают с осями жестко связанной с ВЛА ортогональной системой координат, в дальнейшем называемой базовой системой координат (БСК).
4. Используются теоретическая и “рекомендуемая” настройки фильтра Калмана. В соответствии с рекомендуемой настройкой, в ФК используется заниженное в 8 раз значение матрицы возмущающих шумов Q и завышенное в 10 раз значение матрицы измерительных шумов R относительно их теоретических значений. Начальное значение матрицы ковариаций ошибок оценивания P задано равное теоретическому.
5. Значения инструментальных погрешностей ИБ для дрейфа ГС установлены на уровне $1^\circ/\text{час}$, для смещения нуля АК – на уровне 0.001 м/с^2 .

Использованы следующие модели ошибок измерений гироскопов:

$$\delta\omega_x(t) = \Delta\omega_x + \xi_x(t), \quad \delta\omega_y(t) = \Delta\omega_y + \xi_y(t), \quad \delta\omega_z(t) = \Delta\omega_z + \xi_z(t),$$

$$\Delta\omega_i = 0, \quad i \in \{X, Y, Z\},$$

где $\delta\omega_x, \delta\omega_y, \delta\omega_z$ – проекции ошибки измерения вектора абсолютной угловой скорости вращения ВЛА на оси БСК;

$\Delta\omega_x, \Delta\omega_y, \Delta\omega_z$ – систематические дрейфы ГС;

$\xi_x(t), \xi_y(t), \xi_z(t)$ – случайные составляющие ошибок измерений ГС.

Аналогичные модели ошибок приняты для акселерометров:

$$\delta a_x(t) = \Delta a_x + \zeta_x(t), \quad \delta a_y(t) = \Delta a_y + \zeta_y(t), \quad \delta a_z(t) = \Delta a_z + \zeta_z(t),$$

$$\Delta a_i = 0, \quad i \in \{X, Y, Z\},$$

где $\delta a_x, \delta a_y, \delta a_z$ – проекции ошибки измерения вектора кажущегося ускорения ВЛА на оси БСК;

$\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z$ – систематические смещения нуля АК;

$\zeta_x(t), \zeta_y(t), \zeta_z(t)$ – случайные составляющие ошибок измерений АК.

Дрейф ГС $\Delta\omega_x, \Delta\omega_y, \Delta\omega_z$ и смещение нуля АК $\Delta a_x, \Delta a_y, \Delta a_z$ считаются константами, реализуемые случайным образом из известного диапазона в каждом запуске навигационной системы.

В качестве интегральной ошибки функционирования ИИСНС вычислялась координатная радиальная ошибка:

$$\delta r = \sqrt{(r_{x2} - r_{x1})^2 + (r_{y2} - r_{y1})^2 + (r_{z2} - r_{z1})^2},$$

где r_{x1}, r_{y1}, r_{z1} – проекции истинного радиус-вектора ВЛА на оси геоцентрической неподвижной декартовой СК, вычисленные в имитационной модели движения;

r_{x2}, r_{y2}, r_{z2} – проекции радиус-вектора ВЛА, вычисленные по алгоритмам инерциальной навигации с коррекцией по высоте.

Результаты численных экспериментов представлены на рис. 3–8.

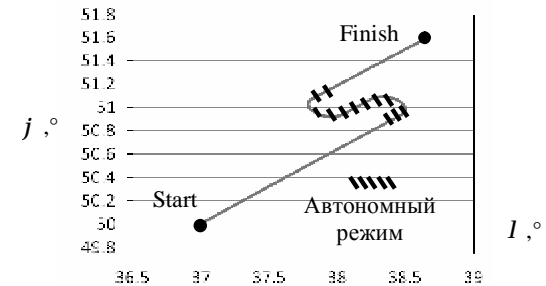


Рис. 1 – Горизонтальная траектория движения ВЛА (программа полета №1)

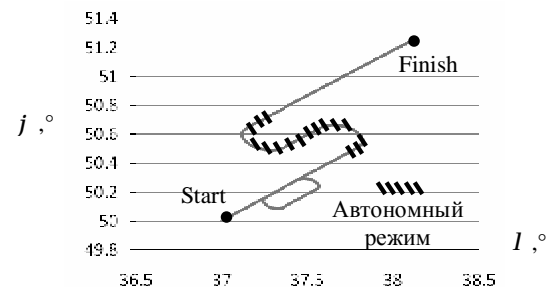


Рис. 2 – Горизонтальная траектория движения ВЛА (программа полета №2)

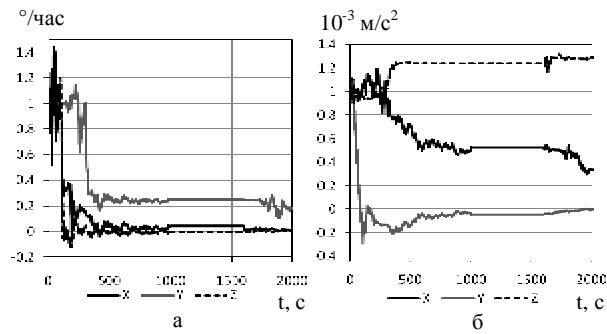


Рис. 3 – Ошибки оценивания дрейфа ГС (а) и смещения нуля АК (б), при использовании теоретической настройки ФК (программа полета №1)

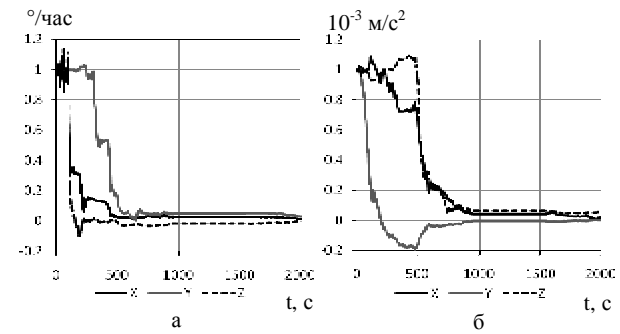


Рис. 6 – Ошибки оценивания дрейфа ГС (а) и смещения нуля АК (б), при использовании рекомендуемой настройки ФК (программа полета №2)

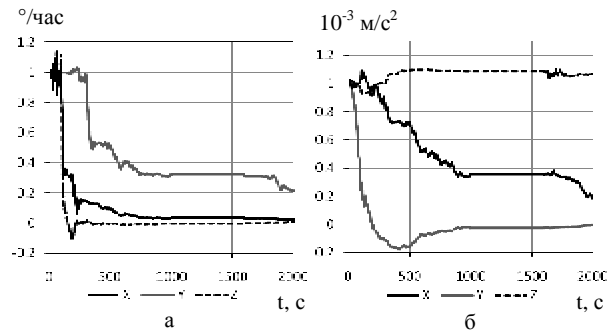


Рис. 4 – Ошибки оценивания дрейфа ГС (а) и смещения нуля АК (б), при использовании рекомендуемой настройки ФК (программа полета №1)

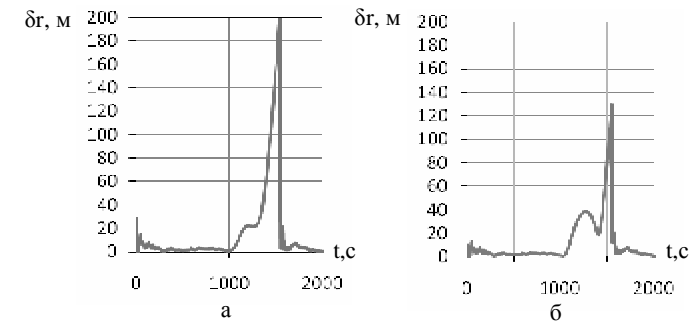


Рис. 7 – Координатная ошибка при теоретической (а) и рекомендуемой (б) настройках фильтра Калмана (программа полета №1)

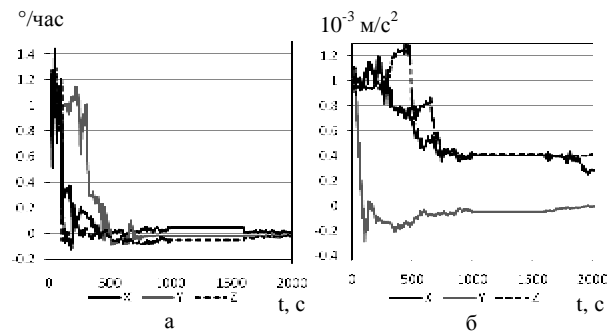


Рис. 5 – Ошибки оценивания дрейфа ГС (а) и смещения нуля АК (б), при использовании теоретической настройки ФК (программа полета №2)

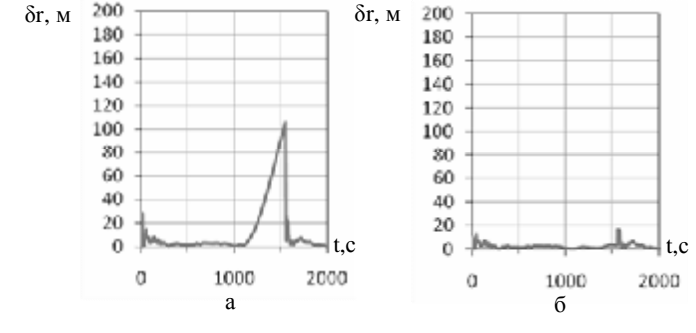


Рис. 8 – Координатная ошибка при теоретической (а) и рекомендуемой (б) настройках фильтра Калмана (программа полета №2)

Как видно из представленных результатов, использование рекомендуемой настройки фильтра Калмана по сравнению с теоретической, позволяет уменьшить относительную погрешность оценивания смещения нуля x-AK и z-AK на 10 % и 25 % соответственно (см. рис. 3, 4). Дополнительный маневр по углу курса в программе полета №2 (см. рис. 1, 2) снижает относительную погрешность оценивания дрейфа y-ГС и смещения нуля z-AK практически на 20 % (см. рис. 3, 5). Рекомендуемая в работе настройка ФК и дополнительный курсовой маневр ВЛА позволяют снизить ошибки оценивания погрешностей всех измерений инерциального блока до величины менее 5 % (см. рис. 6), что сопровождается повышением точности функционирования интегрированной навигационной системы более чем на 50 % (см. рис. 7, 8). Снижение координатной ошибки в автономном режиме обусловлено более точным оцениванием и коррекцией погрешностей измерений инерциального блока ИИСНС в интегрированном режиме.

Выводы. Установлено, что в заданных условиях моделирования, рекомендуемая настройка ФК и дополнительный курсовой маневр позволяют снизить ошибки оценивания погрешностей измерений инерциального блока до величины менее 5 % и более чем на 50 % повысить точность функционирования навигационной системы в автономном режиме.

Таким образом, на основе результатов проведенного исследования, можно сформулировать следующие рекомендации по повышению точности функционирования ИИСНС:

- целесообразно использовать рекомендуемую в работе настройку фильтра Калмана вместо теоретической;
- в начале программы полета ВЛА желательно включить несколько дополнительных курсовых маневров.

Полученные результаты можно использовать при проектировании и усовершенствовании программно-математического обеспечения интегрированных инерциально-спутниковых навигационных систем, а также при разработке рекомендаций по пилотированию.

Список литературы: 1. Кушельман В. Я. Будущее точной навигации – за интегрированными системами / В. Я. Кушельман, А. А. Фомичев // АвиаСоюз, 2005, июнь–июль, №3(5). – С. 50–53. 2. Степанов О. А. Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации / О. А. Степанов // Гирокоспия и навигация. – 2002. – №1(36). – С. 23–45. 3. Успенский В. Б. Настройка фильтра Калмана в задаче комплексирования информации в интегрированной навигационной системе / В. Б. Успенский, А. Д. Аютин // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2010. – № 67. – С. 51–57. 4. Багмут И. А. Наблюдаемость инструментальных погрешностей инерциального блока в интегрированной навигационной системе / И. А. Багмут // Вісник НТУ «ХП». – Харків : НТУ «ХП», 2009. – № 23. – С. 3–14. 5. Брославец Ю. Ю. Имитационная модель движения летательного аппарата / Ю. Ю. Брославец, А. А. Фомичев, А. Б. Колчев [и др.] // Материалы IX Санкт-Петербургской межд. конф. по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ГИЦ РФ ЦНИИ “Электронприбор”. – 2002. – С. 107–109.

Надійшла до редакції 10.06.2011

УДК 681.513:62-50

М. В. ТАЩЛІН, канд. техн. наук, доц., ЛНАУ, Луганськ

ПАРАМЕТРИЧНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕЛІНІЙНОГО ОБ'ЄКТУ НЕЧІТКОЮ РЕГРЕСІЙНОЮ МОДЕЛЛЮ

Розроблена методика ідентифікації залежності «багатовимірний вхід–вихід» нечіткою регресійною моделлю при нечітко заданих вхідних змінних. Розглянута можливість оптимізації нечіткої регресійної моделі шляхом настроювання її параметрів генетичними алгоритмами за навчальною вибіркою експериментальних даних.

Разработана методика идентификации зависимости «многомерный вход–выход» нечеткой регрессионной моделью при нечетко заданных входных переменных. Рассмотрена возможность оптимизации нечеткой регрессионной модели путем настройки ее параметров генетическими алгоритмами по обучающей выборке экспериментальных данных.

The developed method of authentication of dependence «multidimensional entrance–output» of the fuzzy regressive model at the unexpressly set entrance variables. Considered possibility of optimization of fuzzy regressive model by tuning of its parameters by genetic algorithms after the educational retrieval of experimental data.

Постановка задачі. Моделювання певного процесу або явища зводиться зазвичай до апроксимації аналітичної залежності, що в достатній мірі описує взаємозв'язок «входи–вихід». Такий класичний підхід передбачає найчастіше застосування кількісних співвідношень у вигляді рівнянь різного типу. З розвитком інтелектуальних технологій процес встановлення взаємозв'язку між вхідними та вихідними величинами набув нової форми: застосування нейронних мереж, нечіткої логіки та нейро-нечітких підходів. Комбінація цих технологій сумісно з генетичними алгоритмами та ймовірнісними обчисленнями утворила нову методологію під назвою «Soft Computing», що дозволило уникнути багатьох труднощів використання всіх цих напрямів окремо. Певні недоліки використання м'яких обчислень [1] при моделюванні процесів різної природи змусили шукати нових підходів ідентифікації нелінійних об'єктів.

Математична модель. Розглянемо задачу моделювання нелінійних залежностей типу

$$y = f_y(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

з n входами $(x_i, i = \overline{1, n})$ та одним виходом (y) . Передбачається, що вихід y може бути:

а) неперервним, тобто $y \in [y, \bar{y}]$,

б) дискретним, тобто $y \in \{d_1, d_2, \dots, d_m\}$,

де $[y, \bar{y}]$ – діапазон; $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ – класи можливих значень вихідної змінної y .

Дискретизація неперервного виходу, якщо значення вихідної змінної розбити на m підінтервалів, може відбуватись наступним чином:

$$[y, \bar{y}] = \underbrace{[y_1, \bar{y}_1]}_{d_1} \cup \underbrace{[y_2, \bar{y}_2]}_{d_2} \cup \dots \cup \underbrace{[y_m, \bar{y}_m]}_{d_m}$$

Тоді для кожного із класів рішень (інтервалів) можна ввести модель [1]

$$y_j^l = \sum_{i=1}^n a_i^j z_i^j + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j z_{i_1}^j z_{i_2}^j + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n \sum_{i_3 \neq i_1, i_2}^n a_{i_1 i_2 i_3}^j z_{i_1}^j z_{i_2}^j z_{i_3}^j + \mathbf{K}, \quad (2)$$

за якою визначається ступінь належності вихідної змінної j -му класу рішень (підінтервалу) при певному векторі вхідних змінних l -го експерименту. Числа z_i^j встановлюють якою мірою значення x_{i_l} змінної x_i в l -му експерименті сприятливо для попадання в j -й клас рішення (підінтервал), $z_i^j \in [0,1]$. Для кожної змінної x_i значення z_i^j визначаються через функції належності $m_j(x_i)$ її нечіткій множині значень, сприятливих попаданню вихідної змінної у j -й клас рішення (підінтервал). Зрозуміло, що вихідна змінна буде визначатись функцією належності того ж типу, що і вхідна. Для зручності виконання операцій над нечіткими числами будемо використовувати функції $(L-R)$ -типу. Нечітке число $(L-R)$ -типу при фіксованих L і R функціях однозначно буде визначатись трійкою параметрів (a, a, b) [2]. Тоді вихідна змінна у випадку взаємодій другого порядку [1], які в багатьох випадках достатньою мірою описують синергетичний ефект між деякими змінними, опишеться функцією

$$m_j(y_j) = \begin{cases} L \left[\frac{\sum_{i=1}^n a_i^j x_i^j + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^j x_{i_2}^j - y_j}{\sum_{i=1}^n a_i^j a_{ij} + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j (x_{i_1}^j a_{i_2 j} + x_{i_2}^j a_{i_1 j})} \right] \\ R \left[\frac{y_j - \left(\sum_{i=1}^n a_i^j x_i^j + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^j x_{i_2}^j \right)}{\sum_{i=1}^n a_i^j b_{ij} + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j (x_{i_1}^j b_{i_2 j} + x_{i_2}^j b_{i_1 j})} \right] \end{cases} \quad (3)$$

Будемо використовувати функції належності типу $m^T(x) = \left(1 + \left(\frac{x-b}{c} \right)^2 \right)^{-1}$, що мають тільки два параметра настроювання: b – координату максимуму функції і c – коефіцієнт розтягування. Тоді співвідношення (3) можна записати у вигляді

$$m_j(X^*) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sum_{i=1}^n a_i^j b_i^j + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j b_{i_1}^j b_{i_2}^j - \left(\sum_{i=1}^n a_i^j x_i^* + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j x_{i_1}^* x_{i_2}^* \right)}{\sum_{i=1}^n a_i^j c_{ij} + \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2 \neq i_1}^n a_{i_1 i_2}^j (b_{i_1}^j c_{i_2 j} + b_{i_2}^j c_{i_1 j})} \right)^2}. \quad (4)$$

Запропонована методика дозволяє обчислити вихідну змінну у вигляді нечіткої множини $\tilde{y} = \left\{ \frac{m^{d_1}(y)}{d_1}, \frac{m^{d_2}(y)}{d_2}, \dots, \frac{m^{d_m}(y)}{d_m} \right\}$.

У разі неперервного виходу необхідно провести дефазифікацію за одним із відомих методів.

Для розрахунку значень функцій належності вихідної змінної класам $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ можливих її значень за співвідношенням (4) необхідно мати значення параметрів функцій належності $B_j = (b_1^j, b_2^j, \dots, b_n^j)$ та $C_j = (c_1^j, c_2^j, \dots, c_n^j)$ та параметрів $A_j = (a_1^j, a_2^j, \mathbf{K}, a_n^j, a_{12}^j, a_{13}^j, \mathbf{K}, a_{i_1 i_2}^j, \mathbf{K}, a_{n-1n}^j)$ нечіткої регресійної моделі (2).

Таким чином, задача настроювання моделі (2) складається у підборі для кожного із класів можливих значень (підінтервалів) вихідної змінної у таких векторів (A, B, C) , що задовольняють обмеженням

$$a_i^j \in [0, 1], b_i^j \in [b_i^j, \bar{b}_i^j], c_i^j \in [c_i^j, \bar{c}_i^j], i = 1, n, j = 1, m$$

і забезпечують мінімум

$$\sum_{i=1}^M [F(X^l, A, B, C) - y^l]^2 = \min_{A, B, C} \quad (5)$$

для об'єкту $y = F(X, A, B, C)$ з неперервним виходом та умову

$$\sum_{i=1}^L \left[\sum_{j=1}^m [m^{d_j}(X^l, A, B, C) - m^{d_j}(X^l)]^2 \right] = \min_{A, B, C}, \quad (6)$$

$$\text{де } m^{d_j}(X^l) = \begin{cases} 1, & d_j = d^l \\ 0, & d_j \neq d^l \end{cases}, \quad j = \overline{1, m},$$

для об'єкту $(m^{d_j}(X, A, B, C), j = \overline{1, m})$ з дискретним виходом.

Таку параметричну ідентифікацію можна здійснити за навчальною вибіркою генетичними алгоритмами, де хромосомою буде виступати вектор, що складається із компонентів векторів A_j та (B_j, C_j) , $j = \overline{1, m}$.

Для об'єктів з неперервним виходом навчальна вибірка визначається у вигляді M пар експериментальних даних «входи–вихід»:

$$(X^l, y^l), \quad X^l = (x_1^l, x_2^l, \dots, x_n^l), \quad l = \overline{1, M}.$$

Для об'єктів з дискретним виходом навчальна вибірка визначається як L пар даних:

$$(X^l, d^l), \quad X^l = (x_1^l, x_2^l, \dots, x_n^l), \quad d^l \in \{d_1, d_2, \dots, d_m\}, \quad l = \overline{1, L}$$

За можливість, для зменшення розмірності задачі оптимізації, вектори (B_j, C_j) параметрів функцій належностей доцільно знаходити одним із відомих методів побудови функцій належності: при наявності певної групи експертів – методом статичної обробки експертної інформації.

Генетичний алгоритм використовує початкову множину варіантів-рішень (батьків), що кодується як хромосоми $S = (A, B, C)$ і підлягають операціям схрещування і мутації. Операція схрещування формує нові варіанти-рішення, а мутація забезпечує відновлення генів, що були вилучені з популяції в ході операції відбору, і які тепер можуть бути досліджені в новому контексті, та можливість утворення генів, які не були представлені в початковій популяції.

Ініціалізація популяції відбувається випадковим чином через операції:

$$a_i^0 = \text{RANDOM}([0, 1]),$$

$$b_i^0 = \text{RANDOM}(\underline{x_i}, \overline{x_i}),$$

$$c_i^0 = \text{RANDOM}(\underline{c_i}, \overline{c_i}),$$

де $[\underline{c_i}, \overline{c_i}]$ та $[\underline{x_i}, \overline{x_i}]$ – відповідні межі;

$\text{RANDOM}(\underline{x}, \overline{x})$ – операція знаходження рівномірно розподіленого на інтервалі $[\underline{x}, \overline{x}]$ випадкового числа.

Оцінювання хромосоми у популяції виконується за функцією відповідності $FF(S)$ (від англ. fitness function):

$$FF(S) = - \sum_{l=1}^M [F(X^l, A, B, C) - y^l]^2$$

для об'єкту з неперервним виходом, та

$$FF(S) = - \sum_{l=1}^L \left[\sum_{j=1}^m [m^{d_j}(X^l, A, B, C) - m^{d_j}(X^l)]^2 \right]$$

для об'єкту з дискретним виходом.

Вибір батьків для схрещування відбувається в залежності від ймовірності, що розраховується за наступною формулою [3]:

$$P_i = \frac{FF'(S_i)}{\sum_{j=1}^K FF'(S_j)},$$

де $FF'(S_i) = FF(S_i) - \min_{j=1, K} FF(S_j)$.

Для покоління t популяція індивідумів позначається через $P(t)$, а набір нащадків, що були отримані із поточної популяції, – через $C(t)$. З введеними позначеннями загальна структура генетичного алгоритму має вигляд [3]:

Процедура: Генетичний алгоритм

початок

$t := 0$;

ініціалізувати $P(t)$;

оцінити $P(t)$;

поки (не досягнуто умови завершення)

схрещувати $P(t)$ щоб одержати $C(t)$;

оцінити $C(t)$;

Вибрати $P(t+1)$ із $P(t)$ і $C(t)$;

$t := t + 1$;

кінець

кінець.

По закінченню всіх етапів генетичного алгоритму обирається хромосома $S = (A, B, C)$ з найбільшим значенням функції відповідності. Така хромосома представляє субоптимальний розв'язок оптимізаційної задачі.

Висновки. Запропонований генетичний підхід дозволить знайти невідомі параметри нечіткої регресійної моделі, тобто отримати субоптимальний розв'язок задачі оптимізації, що дасть можливість зменшити

до мінімуму розбіжність модельних та експериментальних результатів моделювання.

Список літератури: 1. *Таццилин М.В.* Нечеткая экспертная система с регрессионным механизмом логического вывода / *М. В. Таццилин, Т. И. Каткова* // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Х. : НТУ «ХПІ». – 2009. – № 4. – С. 69–75. 2. *Раскин Л. Г.* Нечеткая математика. Основы теории. Приложения / *Л. Г. Раскин, О. В. Серая*. – Х. : Парус, 2008. – 352 с. 3. *Ротштейн А. П.* Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / *А. П. Ротштейн*. – Винница: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1999. – 320 с. 4. *Штовба С. Д.* Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / *С. Д. Штовба*. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 288с.

Надійшла до редколегії 16.03.2011

УДК 51-73

Е. Л. ПИРОТТИ, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПІ»;
А. В. ЧАЙКА, студентка НТУ «ХПІ»

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ В СРЕДЕ СО СЛУЧАЙНЫМИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Розглянута задача визначення стаціонарних електричних полів у ґрунті. Модель побудована для випадку розташування штирів у вершинах квадрата. Отримані результати дають можливість прогнозувати зміни, які можуть відбуватися під дією навколишнього електростатичного поля на клітинному рівні.

Рассмотрена задача определения стационарных электрических полей в почве. Модель построена для случая расположения штырей в вершинах квадрата. Полученные результаты дают возможность прогнозировать изменения, которые могут происходить под воздействием внешнего электростатического поля на клеточном уровне.

The problem of determining the stationary electric fields in the soil was studied. The model was constructed for the case of the location of pins in the tops of the square. The results, which have been obtained, give the possibility to predict the changes that can occur under the influence of an external electrostatic field on cellular level.

Введение. Существует достаточно большое число работ отечественных и зарубежных авторов, в которых с теоретической и экспериментальной точек зрения рассматривается взаимодействие высокочастотных электромагнитных полей с биологическими объектами разной природы и с разными геометрическими и электрофизическими свойствами. В результате этого взаимодействия можно получать изменение жизненных процессов, происходящих в тканях этих объектов. Такие изменения могут нести как позитивный, так и негативный характер.

Исследования подобного рода проводились и с семенами сельскохозяйственных культур с целью повышения их урожайности, улучшения биохимических свойств, а также устойчивости по отношению к возможным вредителям. При этом, как правило, подобная обработка семян электромагнитными полями происходила в воздушной среде в свободном пространстве или в направляющих системах.

Однако следует отметить, что стимулирующее или ингибирующее действие на биологические объекты может оказывать и стационарное электрическое поле, в котором находятся данные объекты. В полной мере это относится и к семенам и корневым системам сельскохозяйственных культур, находящихся в грунте.

Очевидно, что для проведения теоретического исследования такого взаимодействия необходимо вначале рассмотреть модель распределения электростатического поля в почве, вызванного помещенным в грунт единичным заряженным штырем, а также системой таких штырей, как с одноименными, так и с разноименными зарядами. Подобные исследования и будут проведены в данной работе.

Постановка задачи. На основании уравнений Максвелла построить модель, описывающая распределение электростатического поля, создаваемого заряженными металлическими штырями в грунте, и действующего на находящиеся в этом грунте растения или их семена. Построить модель для случая расположения штырей в вершинах квадрата.

Итак, пусть в землю помещен одиночный металлический штырь с заданными размерами и заданным постоянным потенциалом, поданным на него, см. рис. 1. Поверхность земли при этом будем считать плоской.

Среда 1, находящаяся над границей раздела, является воздухом и характеризуется диэлектрической проницаемостью ϵ_1 и магнитной проницаемостью μ_1 , среда 2 – это почва с проницаемостями ϵ_2 и μ_0 . Поскольку обе указанные среды являются немагнитными, то их магнитные проницаемости одинаковы и равны проницаемости свободного пространства μ_0 . Диэлектрическую проницаемость воздуха можно считать такой же, как и у свободного пространства, то есть $\epsilon_1 = \epsilon_0$.

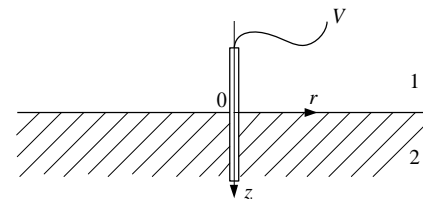


Рис. 1 – Одиночный металлический штырь в грунте, с подведенным напряжением V : 1 – пространство над поверхностью почвы; 2 – почва

В принципе, создаваемое заряженным штырем в почве поле не является настоящим электростатическим, поскольку почва обладает некоторой электропроводностью ($\sigma \neq 0$), причем величина этой электропроводности растет с ростом влажности почвы и увеличением в ней количества различных микроэлементов. Следовательно, заряженный штырь постепенно терял бы свой заряд при отсутствии подаваемого на него постоянного напряжения. Но поскольку в данном случае электропроводность не очень велика, а создаваемые заряженным штырем токи достаточно малы, можно считать, что магнитная энергия процесса остается пренебрежимо малой по сравнению с электрической. Поэтому в дальнейшем будем пользоваться представлениями электростатики.

Как известно [1], система уравнений Максвелла в случае электростатики имеет вид:

$$\begin{cases} \text{rot} \mathbf{E} = 0; \\ \text{div} \mathbf{D} = \rho; \\ \mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \mathbf{E}, \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля;

$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_2 \mathbf{E}$ – вектор электрической индукции;

ρ – плотность электрического заряда;

ε_0 – электрическая постоянная;

ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость среды.

Частное решение для распределения электрического потенциала в почве вокруг заряженного электрического штыря с заданными граничными условиями имеет вид:

$$\psi(r, j) = U + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{r_0}{r} \right)^n \frac{U}{n\pi} (1 - (-1)^n) \sin nj. \quad (2)$$

Полученное выражение (2) позволяет найти напряженность создаваемого штырем электрического поля. При этом величина модуля напряженности электрического поля будет выглядеть следующим образом:

$$|\mathbf{E}| = \sqrt{E_r^2 + E_j^2} = \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{r_0^n}{r^{n+1}}, \quad (3)$$

где n – нечетно.

Приведенные выше выражения (2) и (3) относятся к случаю, когда центр системы координат совпадает с осью заряженного штыря. Однако, поскольку

распределение электромагнитного поля инвариантно относительно выбранной системы координат, то при переходе к системе координат, у которой центр находится в произвольной точке, характер указанных выражений не изменится. Несколько другой вид будут иметь лишь координаты рассматриваемой точки.

Пусть начало координат не совпадает с осью заряженного металлического штыря, погруженного в почву, см. рис. 2. Здесь r' соответствует радиус-вектору точки, совпадающей с осью штыря в перпендикулярной к нему плоскости; r_0 – радиус-вектор точки N , лежащей на поверхности штыря; r – радиус – вектор произвольной точки M , в которой исследуется созданное штырем электрическое поле.

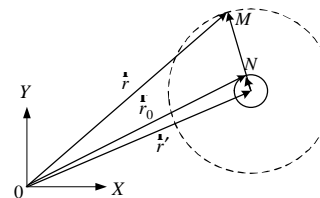


Рис. 2 – Произвольное расположение одиночного металлического штыря в прямоугольной декартовой системе координат

В этом случае выражение (2) примет вид:

$$\psi(r, j) = U + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}'|}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \right)^n \frac{U}{n\pi} (1 - (-1)^n) \sin nj, \quad (4)$$

а выражение (3) –

$$|\mathbf{E}| = \sqrt{E_r^2 + E_j^2} = \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\mathbf{r}_0 - \mathbf{r}'|^n}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^{n+1}}. \quad (5)$$

В дальнейшем будем использовать именно полученные выражения (4), (5).

Рассмотрим теперь участок грунта в форме квадрата, содержащий четыре заряженных штыря в его вершинах, см. рис. 3. Участок расположен параллельно поверхности грунта. Начало прямоугольной системы координат расположено в центре квадрата равноудалено от заряженных стержней. На всех стержнях имеется напряжение одинаковой величины U , но с чередующимся знаком. Иначе говоря, у каждого стержня ближайшие соседи имеют потенциал противоположного знака. Расстояние от центра системы

координат до точки наблюдения M характеризуется радиус-вектором \mathbf{r} , расстояние от начала координат до осей заряженных штырей определяется радиус-векторами $\mathbf{r}'_1, \mathbf{r}'_2, \mathbf{r}'_3$ и \mathbf{r}'_4 , соответственно. Таким образом, в точке M суммируются напряженности плоских электростатических полей, приходящих от вершин квадрата с расстояний $r - r_1, r - r_2, r - r_3, r - r_4$. Длина сторон квадрата равна l .

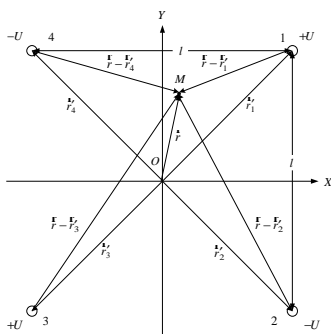


Рис. 3 – Участок грунта в форме квадрата, содержащий четыре заряженных штыря в его вершинах

Определим модуль напряженности электростатического поля в точке M . С этой целью вновь воспользуемся выражением (5), но в виде

$$|\mathbf{E}| = \sqrt{E_r^2 + E_j^2} = \frac{2}{\pi} \sum_{i=1}^4 U_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|\mathbf{r}'_{0i} - \mathbf{r}'_i|^n}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_i|^{n+1}}. \quad (6)$$

В развернутом виде данное равенство выглядит следующим образом:

$$|\mathbf{E}| = \frac{2U}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{|\mathbf{r}'_{01} - \mathbf{r}'_1|^n}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_1|^{n+1}} - \frac{|\mathbf{r}'_{02} - \mathbf{r}'_2|^n}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_2|^{n+1}} + \frac{|\mathbf{r}'_{03} - \mathbf{r}'_3|^n}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_3|^{n+1}} - \frac{|\mathbf{r}'_{04} - \mathbf{r}'_4|^n}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'_4|^{n+1}} \right) \quad (7)$$

Здесь n – четное.

Проведен расчет для определения линий равных напряженностей электростатического поля, создаваемого четырьмя заряженными штырями в почве, см. рис. 4. Расчет проведен в предположении, что расстояние между осями штырей, лежащих на одной стороне квадрата, равно 1 м, величина подаваемого на них напряжения – $\pm 50\text{В}$, штыри имеют диаметр, равный 1 см.

Расположение силовых линий показывает, что наиболее благоприятное нахождение семян растений или их корневой системы с точки зрения максимального воздействия внешнего электростатического поля – это линия, соединяющая оси заряженных штырей. Аналогичный расчет, сделанный для металлических штырей с диаметром 2 см (рис. 5), дает возможность сделать вывод о том, плотность силовых линий между разноименно заряженными штырями возрастает, то есть участок почвы, на котором напряженность электростатического поля минимальна, становится уже. Расчеты, проведенные для штырей с разными диаметрами, показали, что оптимальным является именно диаметр в 2 см.

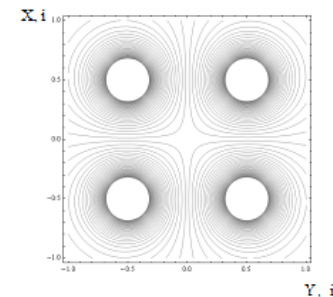


Рис. 4 – Линии равных напряженностей электростатического поля, создаваемого четырьмя заряженными штырями в почве (диаметр штырей – 1 см)

Белые участки вокруг каждого из штырей связаны с тем, что там резко возрастает напряженность электростатического поля, и плотность расположения линий равной напряженности становится слишком большой.

На рис. 6 представлена зависимость амплитуды модуля напряженности электростатического поля от координат точек почвы между заряженными штырями. Данный рисунок подтверждает результаты расчетов на рис. 4, 5, но в трехмерном изображении. Выступы и провалы на поверхности соответствуют расположению штырей. Данный график подтверждает сделанные выше выводы об оптимальных местах расположения сельскохозяйственных растений.

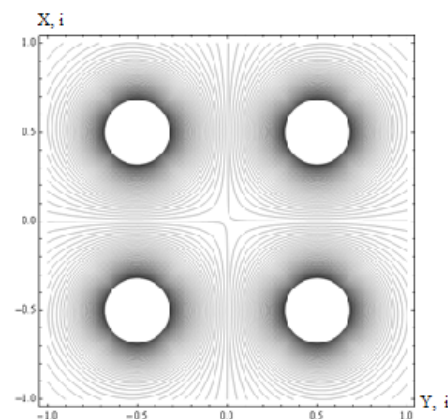


Рис. 5 – Линии равных напряженностей электростатического поля, создаваемого четырьмя заряженными штырями в почве (диаметр штырей – 2 см)

Как было сказано, приведенные аналитические и графические результаты не учитывают возникающих в почве в этом случае слабых токов. Они в свою очередь являются причиной появления

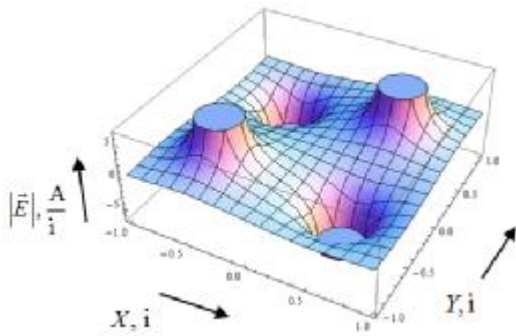


Рис. 6 – Зависимость амплитуды модуля напряженности электростатического поля от координат точек почвы между заряженными штырями

следующей формулой:

$$\psi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi V} \iiint \frac{\rho(\mathbf{r}') + \rho'(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dv', \quad (8)$$

где V – объем грунта, по которому берется интеграл;
 \mathbf{r}' – координата точки расположения заряда.

На основании (8) были проведены численные расчеты создаваемой дополнительно напряженности электрического поля. Число штырей n бралось равным четырем, объем грунта брался в пределах ячейки из этих четырех штырей на глубину 0,5 м. Полученные результаты говорят о том, что добавка к уже существующему электростатическому полю не превышает 10%. Эта величина лежит в пределах погрешности самих расчетов с учетом ошибки задания диэлектрической проницаемости грунта. Таким образом, в дальнейшем при практических расчетах воздействия электростатического поля на сельскохозяйственные культуры эту поправку можно не учитывать.

Выводы. На основании разработанной модели проведен расчет напряженности электростатического поля между штырями. Расчет произведен в предположении, что потенциал между штырями равен 100 В, расстояние между ними равно 1 м. Показано, что оптимальным является расположение растений, которые несколько смещены от линий, соединяющих оси штырей.

Исходя из того, что процессы, происходящие на уровне клетки, связаны с переносом ионов через ее мембрану, исследовано явление активного переноса ионов через мембрану клетки под воздействием внешнего электростатического поля. Получены уравнения, описывающие изменение объема клетки, находящейся во внешнем электростатическом поле, а также потенциала на ее

меняющегося в различных точках грунта заряда. Поскольку мы считаем глубину погружения штырей достаточно большой, то плотность заряда можно считать зависящей только лишь от двумерных координат (x, y) , но не зависящей от вертикального погружения в землю z .

Как известно [4, 5], решение уравнения Пуассона в случае неограниченной среды можно записать, воспользовав-

мембране. Данный процесс зависит как от исходного потенциала, существующего на мембране, так и от амплитуды поля и времени его воздействия.

Проведен численный анализ полученных выражений. Обнаружено, что приложенное внешнее поле существенно влияет как на объем клетки, так и на потенциал на ее мембране. Полученные результаты дают возможность прогнозировать изменения, которые могут происходить под воздействием внешнего электростатического поля на клеточном уровне. Показана возможность активного влияния на ионный состав внутренней и внешней среды клеток и, следовательно, воздействие электростатическим полем на растительную клетку в грунте дольше десяти–тринадцати дней может приводить к ее гибели, что может использоваться для уничтожения сорняков.

Список литературы: 1. Ильинский А. С. Математические модели электродинамики: Учебное пособие для вузов / А. С. Ильинский, В. В. Кравцов, А. Г. Свешников. – М.: Высшая школа, 1991. – 224 с. 2. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления для вузов, т. 2: Уч. пос. для вузов / Н. С. Пискунов. – М.: Наука, 1985. – 560 с. 3. Кальницкий Л. А. Специальный курс высшей математики для вузов / Л. А. Кальницкий, Д. А. Добротин, В. Ф. Жеветжеев. – М.: Высшая школа, 1976. – 390 с. 4. Тихов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихов, А. А. Самарский. – М.: Наука, 1999. – 799 с. 5. Никольский В. В. Электродинамика и распространение радиоволн / В. В. Никольский. – М.: Наука. – 1978. – 544 с. 6. Стрэттон Дж. А. Теория электромагнетизма / Дж. А. Стрэттон. – М.: Гостехиздат, 1948. – 540 с.

Надійшла до редакції 26.05.2011

УДК 621.396

А. Ю. СИДОРЕНКО, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»

ВЫБОР ОСИ СТАЦИОНАРНОСТИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОФИЛОГРАММ ОБРАБОТАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В статті розглянуто метод вибору положення системи координат при дослідженні профілограм поверхонь, що обробляються. Знайдені оцінки основних параметрів шорсткості: дисперсії та коефіцієнту кореляції. Представлені основні результати оцінювання параметрів шорсткості та положення системи стаціонарності.

В статье рассмотрен метод выбора системы координат при исследовании профилограм обработанных поверхностей. Найденны оценки основных параметров шероховатости дисперсии и коэффициента корреляции. Представлены основные результаты оценивания параметров шероховатости и положения система стационарности.

In the article the method of choice of position of the system of coordinates is considered at research of of profilogram the treated surfaces. The estimations of basic parameters of roughness of dispersion and coefficient of correlation are found. The basic results of method are presented and drawn conclusion.

Введение. Исследование профилограм обработанных поверхностей приводит к проблеме выбора положения системы координат и начала отсчета,

так как профилограмма представляет собой последовательность точек. При этом с точки зрения физической задачи эта последовательность точек является некоторой реализацией случайного процесса (дискретного или непрерывного). Как следствие этого, возникает задача выбора системы координат удобной для проведения исследования.

Математическая модель оценивания параметров шероховатости. В данной работе в качестве модели, которая описывает профилограммы и соответствует на практике параметрам шероховатости обработанных поверхностей, рассматривается дискретный квадратичный функционал

$$J_h = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} h_n^2, \quad (1)$$

где $h_n = h(n\Delta)$ – элемент дискретной последовательности отсчетов (мкм);

n – номер элемента выборки ($n = 0, 1, \dots, N-1$);

N – количество элементов в выборке;

L – длина интервала измерений (мкм);

Δ – шаг измерений (мкм), $\Delta = \frac{L}{N-1}$.

Данный функционал имеет нормальное марковское распределение.

Задача оценивания параметров дискретной нормальной случайной последовательности точек и положения системы координат (оси стационарности) рассматривалась для случая независимых наблюдений [1]. Но на практике требование независимости слишком ограничивает исследование профилограмм. Поэтому представляет интерес рассмотрение данной задачи для случая нормального марковского процесса, но с заданным средним \bar{h} и корреляционной функцией

$$K(h_n, h_m) = q_{nm} \cdot S^2, \quad (2)$$

где q_{nm} – набор корреляционных факторов $q_{nm} = e^{-\nu \Delta |n-m|}$, $n, m = 0, 1, \dots$,

ν – декремент затухания, мкм^{-1} ,

S^2 – дисперсия, мкм^2 .

Корреляционная функция такого вида обуславливает марковость рассматриваемого процесса по теореме Дуба [1].

Итак, сформулируем постановку проблемы: известна последовательность точек на плоскости, также известно, что данная последовательность подчиняется нормальному марковскому закону с известным средним и корреляционной функцией. При этом неизвестным является расположение системы координат (СК), а именно ось абсцисс x^* .

Требуется по экспериментальным данным оценить параметры расположения системы координат, относительно которой последовательность обладает заданными свойствами.

Для решения данной задачи можно воспользоваться алгоритмом, описанным в [2]. Выбирается и фиксируется произвольная система координат xOy , при этом искомая ось абсцисс x^* должна проходить через её первый квадрант. Пусть (x', y') – координаты начала O' системы относительно xOy , а j – угол между осями СК xOy и $x'O'y'$, следовательно, необходимо оценить еще параметры j, x', y' .

Задача решается методом максимального правдоподобия. В рамках этого метода используется функция плотности распределения последовательности

$$L_h = \frac{1}{(2pS^2)^{\frac{N+1}{2}} (1-q^2)^{\frac{N}{2}}} \exp \left\{ -\frac{h_0^2}{2S^2} - \frac{1}{2S^2(1-q^2)} \sum_{i=0}^{N-1} (h_{i+1} - qh_i)^2 \right\}. \quad (3)$$

В результате перехода к наблюдаемым СВ (x_i, y_i) по формулам

$$x_i^* = x_i \cos j + y_i \sin j - (x' \cos j + y' \sin j), \quad (4)$$

$$y_i^* = -x_i \sin j + y_i \cos j - (-x' \sin j + y' \cos j), \quad (5)$$

а также простых преобразований получена система уравнений

$$(N+1)u(1-Y^2) - (y_0 - y')^2(1-Y^2) - \sum_{i=0}^{N-1} [k(y_i, y', z, w)]^2 = 0,$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} [k(y_i, y', z, w)] [(1-Y)i+1] = 0,$$

$$(y_0 - y')(1+Y) + \sum_{i=0}^{N-1} [k(y_i, y', z, w)] = 0, \quad (6)$$

$$Y(1+Y) - \frac{Y}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [k(y_i, y', z, w)]^2 + \frac{(1+Y)}{N} \sum_{i=0}^{N-1} [k(y_i, y', z, w)] \left(y_i - y' - \frac{i}{N} \cdot z \right) = 0,$$

где $Y = e^{-w/N}$; $k(y_i, y', z, w) = [\Delta y + [1-Y](y_i - y' - iz/N) - z/N]$; $r = L \cos j$; $z = L \sin j$; $u = S^2 \cos^2 j$; $s = S^2 \sin^2 j$; $w = \nu L$; $\Delta y = y_{i+1} - y_i$; $\Delta x = x_{i+1} - x_i$.

Пользуясь алгоритмом, описанным в [3], можно найти оценки искомым параметров СК. Для этого, введем несколько ограничений:

- 1) длина наблюдаемого промежутка L должна быть достаточно велика;
- 2) декремент затухания ν будет не мал, так чтобы для величины nL выполнялось $1/nL \ll 1$;
- 3) исходная система координат xOy выбрана приблизительно точно, то есть так, что y' и j невелики.

Принимаем число наблюдений N столь большим, что в разложении $\exp(-w/N)$ в ряд с достаточной степенью точности можно сохранить только члены до порядка $1/N$ [4]. Учитывая это предположение, можно переписать систему уравнений (6) относительно z и y' с коэффициентами, зависящими от w . Далее, перейдем к переменным h_i по формуле

$$y_i = \sqrt{u} h_i' + y' + iz/N,$$

где величина h_i' распределена по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией.

Учитывая указанные ограничения и допущения, приходим к следующей системе уравнений для определения оценок \hat{z} и \hat{y}' параметров z и y' :

$$2z + 3y' = 6 \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} i y_i, \quad z + 2y' = 2 \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i.$$

Из этой системы получим для оценок \hat{z} и \hat{y}' параметров z и y' :

$$\hat{y}' = 2 \left(2 \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i - 3 \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} i y_i \right), \quad \hat{z} = 6 \left(2 \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} i y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y_i \right). \quad (7)$$

Полученные оценки (7) при больших значениях N асимптотически совпадают с соответствующими оценками для независимого случая [5]. Они являются асимптотически несмещенными и состоятельными. Аналогично можно рассчитать оценки \hat{x}' и \hat{r} для параметров x' и r

$$\hat{x}' = 2 \left(2/N \sum_{i=0}^{N-1} x_i - 3/N^2 \sum_{i=0}^{N-1} i x_i \right), \quad \hat{r} = 6 \left(2/N^2 \sum_{i=0}^{N-1} i x_i - 1/N \sum_{i=0}^{N-1} x_i \right). \quad (8)$$

В [1] показано, что угол j можно оценить по наблюдениям из соотношения $s/u = \text{tg}^2 j$.

Далее, чтобы оценить длину промежутка \hat{L} , можно воспользоваться введенными обозначениями и полученными оценками \hat{z} и \hat{r} . Окончательно получим

$$\hat{L} = \hat{z} \sin j + \hat{r} \cos j. \quad (9)$$

Если $N \gg 1$, из системы (6) можно теперь найти оценки \hat{w} и \hat{u}

$$\hat{w} = -N \ln \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left(y_i - \hat{y}' - \frac{i}{N} \hat{z} \right)^2 + D}{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left(y_i - \hat{y}' - \frac{i}{N} \hat{z} \right)^2 - \frac{1}{N+1} (y_0 - \hat{y}')^2}, \quad (10)$$

$$\text{где } D = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\Delta y_i - \frac{1}{N} \hat{z} \right) \left(y_i - \hat{y}' - \frac{i}{N} \hat{z} \right);$$

$$\hat{u} = \frac{1}{N+1} \left[(y_0 - \hat{y}')^2 + \frac{G}{(1-Y^2)} \right], \quad (11)$$

$$\text{где } G = \sum_{i=0}^{N-1} \left[\Delta y_i + (1-Y) \left(y_i - \hat{y}' - \frac{i}{N} \hat{z} \right) - \frac{1}{N} \hat{z} \right]^2.$$

Следовательно, на основании (10) – (11) можно найти оценки $\hat{\nu}$ и \hat{S}^2 параметров ν и S^2 :

$$\hat{\nu} = \hat{w} / \hat{L}, \quad \hat{S}^2 = \hat{u} / \cos^2 j. \quad (12)$$

Основные результаты. Результаты вычислений, проведенные по формулам, сведены в таблице.

Параметры последовательностей и их оценки

Объем выборки N	Параметры последовательностей и их оценки					
	$L, \text{мкм}$	$\hat{L}, \text{мкм}$	$S^2, \text{мкм}^2$	$\hat{S}^2, \text{мкм}^2$	$\nu, \text{мкм}$	$\hat{\nu}, \text{мкм}$
100	1.000	0.934	1.000	1.043	1.000	1.245
150	5.000	4.556	1.010	1.052	1.500	1.523
200	10.000	9.654	1.100	1.134	1.700	1.699
250	15.000	14.962	1.300	1.385	2.000	2.041
300	20.000	20.021	1.500	1.542	3.000	3.091

Анализируя данную таблицу, можно сделать вывод, что заданные теоретически параметры последовательностей хорошо согласовываются с полученными оценками при различных объемах выборки.

Теперь можно перейти к практическому применению полученных формул. Итак, пусть задана некоторая случайная дискретная последовательность точек, которая является реализацией нормального марковского процесса (рис. 1).

Необходимо построить ось абсцисс для заданной дискретной последовательности точек. Для построения оси абсцисс можно использовать метод наименьших квадратов и ортогональную регрессию по заданным точкам [6].

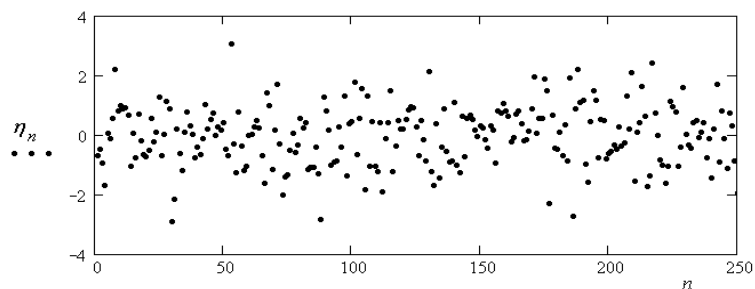


Рисунок 1 – Пример заданной случайной дискретной последовательности ($N = 250$, $s_h = 3$, $n = 5$, $\Delta = 1$)

На рис. 2 показан пример построения оси абсцисс по заданной последовательности точек на плоскости.

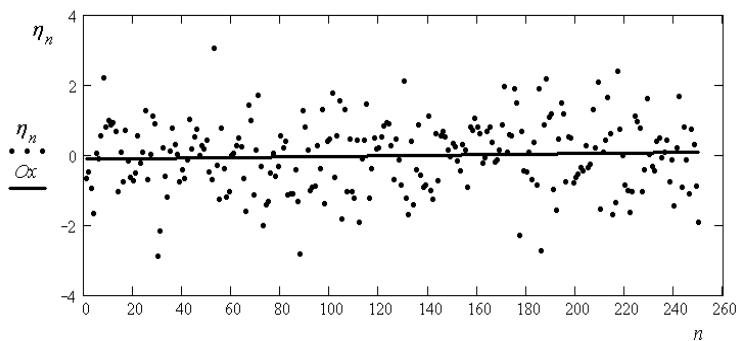


Рисунок 2 – Пример построения оси абсцисс для случайных дискретных последовательностей ($N = 250$, $s_h = 3$, $n = 5$, $\Delta = 1$)

Выводы. Таким образом, практические расчеты показывают, что при больших объемах выборки найденные оценки положения осей координат являются достаточными и состоятельными. Следовательно, при выборе положения осей координат можно использовать прямую линейной регрессии, построенную по дискретным точкам методом наименьших квадратов.

Список литературы: 1. Хусу А. П. Об оценивании параметров случайных последовательностей при неизвестной системе координат / А. П. Хусу // Вестник Ленинградского Государственного Университета. – 1965. – №1. – С. 27–35. 2. Королук В. С. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В. С. Королук – К. : Наукова думка. – 1978. – 584 с. 3. Derin H. Discrete-Index Markov Of Tipe Random Processes / H. Derin, A. Kelly // Proc. IEEE, vol. 77, № 10, pp.1485-1510, 1989. – P. 63–74. 4. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и

инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука. – 1987. – 360 с. 5. Вентцель Е. С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М. : Высшая школа. – 2000. – 383 с. 6. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник. – М. : Физматгиз. – 1962. – 143 с.

Поступила в редколлегию 17.05.2011

УДК 004.932

В. О. КОЛБАСІН, канд. техн. наук, доц. каф. САіУ, НТУ «ХП»;
А. А. ГАРЬКУША, магістрант каф. САіУ, НТУ «ХП»

МЕТОД ВИДІЛЕННЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ НА НЕСТАБІЛІЗОВАНОМУ ВІДЕОЗБРАЖЕННІ

Запропоновано метод виділення об'єктів, що рухаються, у нестабілізованому відеозображенні, заснований на використанні вирахування послідовних кадрів. Метод передбачає виконання стабілізації зображення, виділення областей руху й власне об'єктів, що рухаються. За рахунок використання однієї й тієї ж матриці міжкадрової різниці при стабілізації та виділенні об'єктів, що рухаються, зменшено час обробки даних.

Предложен метод выделения движущихся объектов в нестабилизированном видеоизображении, основанный на использовании вычитания последовательных кадров. Метод предполагает выполнение стабилизации изображения, выделение областей движения и собственно движущихся объектов. За счет использования одной и той же матрицы межкадровой разницы при стабилизации и выделении объектов достигается уменьшение времени обработки данных.

The method for distinguishing moving objects in unstabilized video based on frame subtraction techniques was proposed. It includes several stages: image stabilization, motion areas detection and moving objects selection. Due to using the same matrix of interframe difference in stabilization and motion object detection stages time of data processing was reduced.

Вступ. Відеоспостереження почало розвиватися як простий охоронний телевізійний контроль. Першу пропозицію про контроль над громадським порядком у публічних місцях запропонувала поліція США в 1965 році і вже у 1969 році охоронні камери були встановлені в будівлі Нью-Йоркського муніципалітету біля мерії. Ця практика швидко поширилася на інші міста, і за допомогою систем телевізійного відеоспостереження співробітники поліції вели постійне спостереження за порядком.

Однак системи спостереження того часу мали серйозні недоліки. По перше, було необхідно вчасно міняти плівки, на які виконувався запис, бо через певний проміжок часу вони зношувалися. По друге, було дуже складно виконувати пошук потрібних фрагментів і при багаторазовому перегляді плівки вона також робилася непридатною для подальшого використання.

З появою цифрових засобів відео спостереження проблему зношування плівок для запису було якоюсь мірою вирішено, але не вирішеною

залишається проблема аналізу величезного об'єму інформації, отриманої у результаті відеоспостереження. Зазвичай оператор має переглядати ділянки запису, на яких об'єкт входить до зони спостереження, або виходить з неї, і оператор має визначити характеристики об'єкту – чи є він шуканим, небезпечним та чи порушує він певні правила. Розвиток методів автоматичного розпізнавання зробив можливим створення систем, які порівнюють зображення людей на відеозображенні з фотографіями шуканих осіб – відомих терористів або злочинців. Але для використання цих методів потрібно виділити об'єкт, який рухається, і тому проблема виділення рухомих об'єктів на відеозображенні у режимі реального часу в умовах дії різного роду перешкод залишається актуальною.

Треба зазначити, що у якості перешкод можуть виступати як фактори, що спотворюють лише зображення об'єкта, що рухається, так і фактори, які спотворюють усе зображення в цілому. До останньої групи факторів для значної групи систем відеоспостереження, яка зокрема включає системи спостереження за рухом транспорту, відноситься коливання камери. Одночасний рух камери і об'єкту спостереження суттєво ускладнює процес виділення рухомого об'єкту і погіршує результати ідентифікації об'єкту. Тому дана робота присвячена вирішенню задачі виявлення рухомого об'єкту при використанні камери спостереження без апаратної стабілізації.

Виділення рухомих об'єктів на зображенні. Зазвичай для детекції руху та виділення рухомих об'єктів використовується метод міжкадрової різниці [1, 2]. Суть даного методу полягає в наступному. Припустимо, що параметри і положення камери, так само як і освітлення не змінюються протягом двох послідовних кадрів. Тоді кадри можуть відрізнитися тільки за рахунок руху об'єктів у кадрі. Отже, проаналізувавши зміни зображення між сусідніми кадрами можна визначити наявність руху й оцінити характеристики об'єктів, що рухаються.

Зазвичай у якості міри зміни зображення між двома кадрами S_1 і S_2 використовується матриця міжкадрової різниці P , яка знаходиться як

$$P_{i,j} = |S_{1,i,j} - S_{2,i,j}|, \quad i = \overline{1,W}, j = \overline{1,H} \quad (1)$$

де W, H – ширина та висота кадру.

Якщо група пікселів відповідає нерухомому елементу, то для них значення елементів P буде дорівнювати або буде наближено до нуля. Якщо ж у деякій області відбувається рух, у кадрі пікселі об'єкта заміщуються пікселями заднього фону і навпаки. За рахунок цього значення відповідних елементів матриці міжкадрової різниці P буде значно більше нуля.

Далі визначаються межі прямокутних областей, що містять достатню кількість точок міжкадрової різниці, значення яких більше граничного значення T , та не стикаються одна одної. Ці області попередньо розглядаються як межі об'єктів. Вибираючи різні значення порогу T , можна

зробити метод більш або менш чутливим до впливу цифрового шуму та руху малих предметів, таких як листя або птахи. З урахуванням апріорного знання про розміри об'єктів інтересу частина виділених областей відсікається, а частина – об'єднується.

Для уточнення параметрів руху об'єкту та його зображення інформація по виділених зонах може бути усереднена по послідовності кадрів. Також усереднення може бути використане для захисту від артефактів – помилково визначених об'єктів.

Приклад роботи даного методу представлений на рисунку нижче.



Два сусідніх кадри вихідного відеозображення в градації яскравості (а, б) та інвертована матриця міжкадрової різниці між ними (в).

Але цей метод може бути використаний лише тоді, коли матриця міжкадрової різниці P залежить виключно від руху об'єктів у кадрі. Якщо ж камера коливається або змінюється освітлення, елементи матриці P можуть бути більшими за нуль для елементів, що відповідають нерухомим об'єктам. У цьому випадку потрібно виконати компенсацію зміни освітлення або попередню стабілізацію зображення.

Стабілізація відеозображення. Для стабілізації послідовності кадрів відеозображення потрібно знайти траєкторію руху камери і зсунути зображення на кадрах у відповідності до руху камери так, щоб статичні нерухомі об'єкти на відеозображенні були в одній і тій же позиції. Якщо припустити що кадр S_1 було знято у правильному положенні камери, то для стабілізації кадру S_2 треба знайти такі значення зсуву зображення dx, dy , щоб різниця між цими кадрами була найменшою

$$(dx, dy) = \arg \min_{\substack{dx = -MW, MW \\ dy = -MH, MH}} \sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H v_{i,j} \cdot |S_{1,i,j} - S_{2,i+dx, j+dy}|, \quad (2)$$

де MW, MH – розміри інтервалів пошуку;

$v_{i,j}$ – вагові коефіцієнти, $v_{i,j} \in [0,1]$.

Вагові коефіцієнти можуть бути використані у разі, якщо певна частина кадру зазвичай зайнята рухомими об'єктами і її не треба використовувати для прив'язки кадру під час стабілізації зображення. Такою ділянкою кадру може

бути листя на дереві, або сильно завантажена автомобільним потоком частина траси. Для подібних ділянок коефіцієнти $v_{i,j}$ мають бути близькими до 0, а для ділянок, де знаходяться нерухомі об'єкти – близькими до 1.

Після знаходження значень зсуву, треба змістити зображення на кадри S_2 протилежно напрямку зсуву, тобто на $-dx$, $-dy$ пікселів. Порожні межі кадру, що виникли у результаті зсуву зображення можуть бути заповнені різним чином, у залежності від характеру відеозображення, що стабілізується.

Реалізація виділення рухомих об'єктів з попередньою стабілізацією. У випадку, коли камера коливається, перед пошуком рухомих об'єктів на відеозображенні потрібно виконати стабілізацію відео. Але незалежне виконання стабілізації та пошуку відео потребує значних обчислювальних ресурсів. Якщо поглянути на формули (1) та (2) можна побачити, що як стабілізація, так і пошук рухомих об'єктів використовують ту саму міжкадрову різницю. На підґрунті цього у даній роботі пропонується наступний алгоритм спільного виділення рухомих об'єктів та стабілізації відеозображення.

На першому етапі обчислюється зображення кадру у градаціях яскравості за формулою

$$c_{i,j} = 0.3 \cdot r_{i,j} + 0.59 \cdot g_{i,j} + 0.11 \cdot b_{i,j}, \quad (3)$$

де $r_{i,j}, g_{i,j}, b_{i,j}$ – значення червоного, зеленого та синього каналів зображення пікселя з координатами i, j ;

$c_{i,j}$ – значення яскравості пікселя з координатами i, j .

Це перетворення дозволяє зменшити об'єм даних, що обробляються, без суттєвої втрати ефективності.

На другому етапі виконується стабілізація відеозображення. Для пришвидшення цього процесу використовується пірамідальний принцип обробки зображень [3]. Відповідно до нього спочатку пошук зсуву виконується для зменшених кадрів, а потім уточнюється для збільшених кадрів. Враховуючи те, що камери спостереження можуть коливатися у відносно малому діапазоні, та відносно малий розмір кадрів у даній роботі пошук зсуву виконується на основі зменшених у 4 та 2 рази кадрів та вихідного повнорозмірного кадру. Відповідно до ступеню зменшення кадру, зменшуються і розміри інтервалів пошуку MW, MH .

При виконанні уточнення величини зсуву для кожного розміру зображення формується і запам'ятовується матриця міжкадрової різниці. При знаходженні поточного мінімуму міжкадрової різниці разом з ним запам'ятовується і матриця міжкадрової різниці. Таким чином після знаходження параметрів зсуву набір матриць міжкадрової різниці для кожного з розмірів кадру виявляється вже обчисленим і може бути використаний на подальших етапах.

На третьому етапі на основі обчисленої матриці міжкадрової різниці виконується пошук ділянок областей зображення, що відповідають рухомих об'єктам. Для цього вибираються точка матриці міжкадрової різниці, значення яких більше порога T і виконується групування дотичних до неї точок, значення яких також більше порога. У якості меж ділянки використовується прямокутник, який включає в себе усі точки групи.

Далі на основі апріорної інформації о розмірах об'єктів відкидаються або приєднуються до інших ділянки об'єкти малого розміру.

Заключним етапом у процесі виділення об'єкта є знаходження його в областях руху. Для цього необхідно відокремити в області групу пікселів, які є елементами фону, від групи пікселів, які є елементами об'єкта. У якості маски об'єкту може бути використаний фрагмент матриці міжкадрової різниці, після використання над його елементами граничної функції

$$Th(x) = \begin{cases} 0, & x < T \\ 1, & x \geq T \end{cases}. \quad (4)$$

Але якщо декілька об'єктів розташовані близько один до одного, вони можуть переплутатись. Тому необхідно перевірити, якому з рухомих об'єктів відповідає кожна ділянка руху. Для цього з використанням отриманого раніше набору зменшених зображень для кожної ділянки руху виконується пошук якої з знайдених для попереднього кадру ділянок вона відповідає. Пошук починається з найближчої ділянки руху і закінчується у разі, якщо відповідна різниця між ділянками буде менше порогу.

Якщо виконати дану процедуру для всіх кадрів, то можна буде виділити групу об'єктів, які рухалися за час зйомки, а також визначити час руху, а при деяких відомих даних, визначити швидкість і форми об'єктів.

Висновки. Запропонована реалізація дозволяє зменшити затрати обчислювальних ресурсів для пошуку об'єктів, що рухаються, у разі використання камери без стабілізації, і забезпечує обробку даних з чотирьох камер спостереження у режимі реального часу. Якість виділенні об'єктів є задовільною і для її покращення можна використовувати більш складні методи аналізу ділянок руху. В цілому запропонований метод може бути використаний для створення систем відеоспостереження, зокрема для систем спостереження за рухом на автошляхах.

Список літератури: 1. Wang L. Recent developments in human motion analysis / L. Wang, W. Hu, T. Tan // Pattern Recognition. – 2003. – Vol. 36, № 3. – P. 585–601. 2. Haritaoglu I. W4: A Real-Time System for Detecting and Tracking People / I. Haritaoglu, D. Harwood, L.S. Davis // Lecture Notes in Computer Science. Computer Vision and Pattern Recognition. – 1998. – P. 962–967. 3. Adelson E. H. Pyramid methods in image processing / E. H. Adelson, C. H. Anderson, J. R. Bergen, P. J. Burt, J. M. Ogden // RCA Engineer. – 1984. – № 29-6. – P. 33-41.

Надійшла до редколегії 20.05.2011

ЗМІСТ

<i>Кононенко И. В., Букреева К. С., Сукач С. А.</i> Исследование устойчивости решения задачи методом оптимизации портфеля проектов предприятия для планового периода	3
<i>Ващук Ф. Г., Павлов О. А., Місюра О. Б., Мельник О. О.</i> Складання розкладів груп для одного приладу із налагодженнями за критерієм мінімізації сумарного випередження і запізнення.....	8
<i>Годлевський М. Д., Абабілов О. О.</i> Розробка бібліотеки паралельних генетичних алгоритмів огарга для роботи в MPI-середовищі.....	19
<i>Марченко Н. А., Сотникова Є. В.</i> Особливості розробки розподіленої експертної системи перевірки психологічної сумісності колективу.....	23
<i>Дорофєєв Ю. І., Булавіна К. С.</i> Аналіз споживчого ринку засобів мобільного зв'язку за допомогою штучних нейронних мереж	27
<i>Северин В. П., Федянина К. Б.</i> Параметрический синтез нечеткого регулятора для системы управления паровой турбиной с применением генетического алгоритма.....	33
<i>Северин В. П., Северина Н. Ю., Витязь М. Н.</i> Многокритериальный синтез систем автоматического управления ядерным реактором ВВЭР-1000.....	40
<i>Мокін О. Б.</i> Математичні моделі оптимального руху завантаженого електричного транспортного засобу на підйомах і спусках.....	47
<i>Михлин Ю. В., Решетникова С. Н., Ахизер Е. Б.</i> Решение задачи оптимального управления шахтными подъемными установками	54
<i>Копп В. Я., Осинский Ю. А., Филиппович О. В., Гарматюк М. И.</i> Экспериментальные исследования динамических характеристик колебательного шагового пневмопривода поворотного действия.....	64
<i>Петрунина Т. С.</i> Численный анализ структурных свойств хаотических временных рядов.....	71
<i>Хацько Н. Е.</i> Идентификация конструктивных параметров летательного аппарата.....	76
<i>Багмут И. А.</i> К вопросу о повышении точности оценивания инструментальных погрешностей инерциального блока интегрированной навигационной системы.....	81
<i>Тащілін М. В.</i> Параметрична ідентифікація нелінійного об'єкту нечіткою регресійною моделлю.....	88
<i>Пиротти Е. Л., Чайка А. В.</i> Моделирование распределения электростатического поля в среде со случайными электрофизическими характеристиками.....	93
<i>Сидоренко А. Ю.</i> Выбор оси стационарности при исследовании профилей обработанных поверхностей	100
<i>Колбасін В. О., Гарькуша А. А.</i> Метод виділення рухомих об'єктів на нестабілізованому відеозображенні.....	106

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ «ХП»**

Збірник наукових праць

Тематичний випуск
«Системний аналіз, управління
та інформаційні технології»

№ 32'2011

Наукові редактори М. Д. Годлевський, О. С. Куценко
Технічний редактор М. І. Безменов

Відповідальний за випуск І. Б. Обухова

Обл.-вид № 124-11.

Підп. до друку 23.09.2011 р. Формат 60×84 1/16. Папір офісний.
RISO-друк. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 7,45. Облік.-вид. арк. 8,2.
Наклад 300 прим. Перший завод 1–100. Зам. № 2/0928. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

ФОП Стеценко І. І., 61019, Харків, пр. Ілліча, 103а, кв. 21,
тел. 758-17-35