

ISBN 5-7763-8361-7

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

УКРАИНСКАЯ АССОЦИАЦИЯ ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ

АВТОМАТИКА

АВТОМАТИЗАЦИЯ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ

КОМПЛЕКСЫ И

СИСТЕМЫ

№ 2(20) 2007

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
УКРАИНСКАЯ АССОЦИАЦИЯ ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

АВТОМАТИКА. АВТОМАТИЗАЦИЯ.
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Издание Херсонского национального технического университета

№ 2(20)

ХЕРСОН

2007

Основан в июле 1997 г.

Выходит два раза в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор: Тодорцев Ю.К.

Члены редколлегии: Аркадьев В.Ю., Бардачев Ю.Н., Бойко В.И., Большевцев А.Д., Бондарь В.М., Бражник А.М. (зам. главного редактора), Гаврилюк В.И., Герасимьяк Р.П., Григоровский Е.П., Гринавцев В.Н., Демченко В.А., Дудюк Д.Л., Дубинец Л.В., Живица В.И., Карпинский М.П., Кондратенко Ю.П., Кузнецов Б.И., Ладанюк А.П., Лут М.Т., Лубяный В.З., Максимов М.В., Марасанов В.В., Мартиненко И.И., Мережко Ю.И., Михайлик В.Д., Мишин В.И., Павлов А.А., Праховник А.В., Радимов С.Н., Рогальский Ф.Б., Садовой А.В., Сарибеков Г.С., Смолин Ю.А., Ткаченко А.Н., Тришкин В.Я, Труш В.Е., Ходаков В.Е., Хомченко А.Н. (зам. главного редактора), Червяков В.Д., Шарко А.В., Шикалов В.С., Эриванцев И.Н., Яськив В.И., Лебеденко Ю.А. (технический редактор)

ОРГАНИЗАЦИИ - ОСНОВАТЕЛИ ЖУРНАЛА

Херсонский национальный технический университет
Одесский национальный политехнический университет
Национальный технический университет Украины «КПИ»
Международный университет гражданской авиации
Одесская государственная академия холода
Днепродзержинский государственный технический университет
Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры
Национальный аграрный университет
Украинский государственный химико-технологический университет
Украинский государственный университет пищевых технологий
Украинская инженерно-педагогическая академия
Национальный университет кораблестроения им. Ад. Макарова
Украинский государственный лесотехнический университет
Сумской государственной университет
Киевский национальный университет строительства и архитектуры
Киевский национальный университет технологий и дизайна
Тернопольский государственный технический университет им. Ивана Пулюя
Тернопольская академия народного хозяйства
Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта
Херсонский государственный аграрный университет

Усл. печ. листов 13,1 Тираж - 200 экз. Формат 60x84 1/8

Свидетельство о регистрации КВ № 2997 от 10.12.1997 г.

Офсетная печать

Цена договорная

© Херсонский национальный технический университет

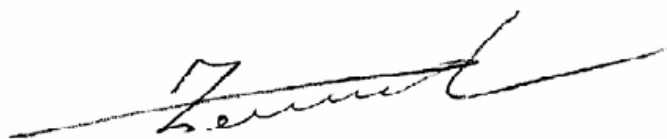
В течении десяти лет Херсонский национальный университет в содружестве 20 крупнейшими университетами Украины издает межвузовский сборник «Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы» ААЭКС.

Коллектив редакционной коллегии насчитывающей 40 докторов наук, возглавляемый заведующим кафедрой автоматизации теплоэнергетических процессов Одесского национального политехнического университета доктором технических наук профессором Тодорцевым Юрием Константиновичем, в течение десяти лет трудится на благо развития украинской научной мысли. Соответствие требованиям ВАК Украины, регулярность издания и компетентность редакционной коллегии определили авторитет журнала в научном сообществе.

Поздравляя коллектив редакционной коллегии с десятилетием журнала, выражаю от лица членов редколлегии, авторов и читателей журнала благодарность инициаторам создания журнала, в том числе профессорам Аркадьеву В.Ю, Тодорцеву Ю.К. Выражаю благодарность ученым, взявшим на себя труд рецензирования материалов журнала и техническим сотрудникам редакции.

Выражая общее мнение многочисленного авторского коллектива журнала, надеюсь на долголетие и молодую энергию коллектива редакции журнала, чей труд служит вечным идеалам просвещения, и развития научной мысли.

Ректор Херсонского национального технического университета доктор технических наук, профессор Бардачев Юрий Николаевич.



СОДЕРЖАНИЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

<u>Бідюк П.І., Литвиненко В.І., Кроптя А.В.</u> Аналіз ефективності функціонування мережі Байєса	6
<u>Исаев Е.А., Наговский Д.А.</u> Математическое описание влияния кривизны контактирующих тел на угол смачивания жидкости в межчастичном пространстве.....	16
<u>Ковриго Ю.М., Фоменко Б.В., Полищук И.А.</u> Математическое моделирование систем автоматического регулирования с учетом ограничений на управление в пакете Matlab	21
<u>Ложечников В.Ф., Михайленко В.С., Максименко И.Н.</u> Аналитическая многорежимная математическая модель динамики газовоздушного тракта барабанного котла средней мощности	29
<u>Передерий В.И., Еременко А.П.</u> Математические модели и алгоритмы определения релевантности принимаемых решений с учетом психофункциональных характеристик пользователей при управлении автоматизированными динамическими системами	34
<u>Хомченко А.Н.</u> Новые решения обобщенной задачи Бюффона	41
<u>Бакшанська Т.Д., Рижиков Ю.Г., Тодорцев Ю.К.</u> Математична модель процесу горіння природного газу з рециркуляцією продуктів згорання для цілей управління	44

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

<u>Шеховцов А.В., Везумский А.К., Серeda Е.С.</u> Алгоритм сжатия информации без потерь: модифицированный алгоритм LZ77	52
<u>Гасанов А.С.</u> Информационные технологии построения систем прогнозирования отказов	58
<u>Грицик В.В.</u> Застосування штучних нейронних мереж при проектуванні комп'ютерного зору.....	65
<u>Кириллов О.Л., Якимчук Г.С., Якимчук С.Г.</u> Изучение электрического поля с помощью датчика измерителя электростатического потенциала на модели замкнутого металлического объема.....	68
<u>Ролик А.И.</u> Модель управления перераспределением ресурсов информационно-телекоммуникационной системы при изменении значимости бизнес-процессов	73
<u>Слань Ю. М., Трегуб В. Г.</u> Оперативна нейромережна ідентифікація складних об'єктів керування.....	83
<u>Фефелов А. А.</u> Использование байесовских сетей для решения задачи поиска места и типа отказа сложной технической системы	87
<u>Хобин В.А., Титлова О.А.</u> К вопросу измерения парожидкостного фронта в дефлегматоре абсорбционно-диффузионной холодильной машины (АДХМ)	94
<u>Шиманські З.</u> Апаратні засоби сегментації мовного сигналу	102

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

- Бардачев Ю.Н., Дидык А.А.** Использование положений теории опасности в искусственных иммунных системах..... 107
- Литвиненко В.И., Четырин С.П.** Компенсация ошибок оператора в контуре управления следящей системы на основе синтезируемых вейвелет-сетей 112

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ И СИСТЕМАМИ

- Ладісва Л.Р., Зав'ялова Т.П.** Оптимізація плівкового апарату роторного типу за максимальною продуктивністю..... 124
- Корнієнко Б.Я., Снігур О.В.** Оптимізація параметрів процесу зневоднення і гранулоутворення в апараті псевдозрідженого шару 131

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

- Вишневский Л.В., Веретенник А.М., Войтецкий И.Е.** Выбор критерия для оценки процесса включения генераторов на параллельную работу 136
- Клименко А.К.** Об ускорении сходимости процессов в адаптивной системе с обратной моделью 140
- Ковриго Ю.М., Мовчан А.П., Полищук И.А., Фоменко Б.В.** Адаптивное управление теплоэнергетическими процессами..... 147
- Михайленко В.С., Никольский В.В.** Использование нечеткой адаптивной системы управления для компьютерного мониторинга сетью котельных установок..... 157
- Шеховцов А.В., Крючковский В.В., Мельник А. Н.** Решение многокритериальной оптимизации с использованием адаптивных алгоритмов 163

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

- Черевко О.И., Ефремов Ю.И., Одарченко А.М., Одарченко Д.М., Агафонова Ю.Ю.** Теоретическое обоснование перспективного биконического резонатора для свч-устройств при переработке растительного сырья 169

ЭКОНОМИКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА

- Пляшкевич О.М., Забитовська О.І.** Моделі інформаційних технологій оптимізації поведінки виробника..... 175
- Пляшкевич О.М.** Моделі і методи інформаційних технологій виробництва 179
- РЕФЕРАТЫ**..... 183
- СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**..... 188

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-50

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕРЕЖІ БАЙЄСА

Бідюк П.І., Литвиненко В.І., Кроптя А.В.

Мережа Байєса (МБ) – це ймовірнісна графічна модель причинних зв'язків між якісними та кількісними змінними, яка створюється для описання статистики або динаміки об'єктів різної природи з метою формування висновку щодо того чи іншого (поточного) стану досліджуваного об'єкта. Будь-яка нова інформація щодо об'єкта використовується для оновлення розподілів ймовірностей станів, які характеризуються вузловими змінними мережі. На основі оновлених розподілів ймовірностей формується статистичний висновок, який дає можливість особі, що приймає рішення (ОПР), прийняти рішення щодо виконання відповідних дій. Перевагою мереж Байєса у порівнянні з іншими підходами до врахування та обробки невизначеностей різної природи є достатня формалізація всіх етапів їх побудови та використання.

Байєсові мережі знаходять все ширше застосування в обробці статистичних, даних, представлених часовими рядами і часовими перерізами, а також якісними даними, представленими експертними оцінками, лінгвістичними змінними і т. ін. Судячи з числа публікацій, саме широке застосування БМ знайшли у розв'язку задач медичної діагностики, де вони допомагають ставити та уточнювати діагнози самих різних хвороб в умовах неточної та неповної інформації [1-8]. Відомі застосування БМ в системах технічної діагностики – система моніторингу космічного корабля багаторазового використання, діагностика двигунів різного призначення, аналіз стану технологічних процесів та технічних систем [9-12]. Широке застосування знаходять БМ в системах класифікації даних різної природи [13], системах автоматичного розпізнавання мовних сигналів [14], маркетингу і бізнесі [15, 16], а також у багатьох інших сферах діяльності [17, 18]. Загалом БМ дає можливість відтворити причинно-наслідкові зв'язки між подіями та визначити ймовірності настання тієї чи іншої ситуації при отриманні нової інформації (свідчення) щодо зміни стану будь-якого вузла (змінної) мережі. Ступінь успішності застосування даного методу моделювання та формування статистичного висновку залежить від вміння коректно сформулювати постановку задачі, вибрати змінні процесу, які в достатній мірі характеризують його динаміку або статистику, зібрати статистичні дані та використати їх для навчання мережі, а також коректно сформулювати результат – висновок за допомогою побудованої мережі.

Оскільки МБ – це допоміжний інструмент при прийнятті рішень, то виникає питання щодо його ефективності і як змінюється його ефективність в часі? Невизначеності, притаманні окремим змінним та групам змінних МБ, стають ключовими факторами впливу на рішення, що приймаються за участю МБ. Розглянемо міру невизначеності, зв'язану з деякою випадковою змінною, яка є елементом МБ.

Постановка задачі

Метою даної роботи є:

- виконання аналізу ефективності функціонування мереж Байєса в загальному випадку;
- встановлення можливості побудови кількісного критерію для оцінювання міри невизначеності, яка може бути описана за допомогою МБ.

Розв'язання задачі

Формально, БМ – це графічна модель процесу, яка визначається трійкою $\mathbf{N} = \langle \mathbf{V}, \mathbf{G}, \mathbf{J} \rangle$, першою компонентою якої є множина змінних \mathbf{V} ; другою – спрямований

ациклічний граф G , вузли якого відповідають випадковим змінним модельованого процесу; J – спільний розподіл ймовірностей змінних $V = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$. При цьому стосовно множини змінних виконується марковська умова, тобто кожна змінна мережі не залежить від усіх інших змінних, за винятком батьківських попередників цієї змінної.

Нехай $X(k) = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ – дискретна змінна, яка приймає конкретні значення з ймовірностями $p(X = x_i) = p(x_i)$. У відповідності до байєсівської інтерпретації будемо розглядати так звані суб'єктивні ймовірності, тобто ймовірність, як міру довіри, що ґрунтується на наших поточних знаннях про процес чи об'єкт. Однак, цих знань може виявитись недостатньо для формування альтернативи при прийнятті рішення, тобто виникає *поточна ситуативна невизначеність*. Міру цієї невизначеності можна сформулювати так: „мірою поточної невизначеності є об'єм інформації, який необхідно додати до наявної поточної інформації (знань) про процес з метою ідентифікації конкретної альтернативи щодо прийняття рішення.”

Тобто для визначення конкретної альтернативи при прийнятті рішення необхідно провести додатковий експеримент з метою отримання необхідної інформації. В такому випадку за міру невизначеності можна прийняти число можливих альтернатив та відповідний розподіл ймовірностей $p(\cdot)$. Усереднену невизначеність, зв'язану з випадковою змінною X , можна оцінити за допомогою ентропії Шеннона

$$h(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log[p(x_i)]. \quad (1)$$

Якщо за основу логарифму прийняти 2, то одиницею виміру ентропії буде один біт, що зручно для аналізу. У випадку повної інформації про процес, наприклад, відомо, що $X = x_1$ і $p(x_1) = 1$, отримуємо: $h(X) = 0$. Якщо ж поточна інформація про об'єкт є повністю невизначеною, тобто значення змінної X мають рівномірний розподіл, $p(x_i) = 1/n$, то вибрати одну альтернативу з множини допустимих неможливо. У цьому випадку $h(X)$ приймає максимальне значення:

$$h(X) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log[p(x_i)] = - \frac{1}{n} \left[\log \frac{1}{n} + \dots + \log \frac{1}{n} \right] = - \log \frac{1}{n} = \log n.$$

Тому в загальному випадку можна прийняти, що $h(X)$ є мірою інформації, необхідної для подолання невизначеності, яка визначається розподілом ймовірності $p(x_i)$.

З іншого боку $h(X)$ можна розглядати як міру розсіювання розподілу $p(x_i)$, тобто концепція ентропії відіграє таку ж роль, як дисперсія у статистиці. Однак $h(X)$ має більш загальне призначення ніж дисперсія, оскільки змінна X може приймати кількісні та якісні (лінгвістичні) значення.

В МБ ймовірності (ступінь довіри) розповсюджуються від інформаційних змінних до змінних, щодо яких формулюються гіпотези, що дає можливість розглядати МБ як множини „інформаційних каналів”. Якщо прийняти таку концепцію МБ, це дасть можливість використати результати теорії інформації при аналізі невизначеностей. Оскільки інформація розповсюджується в МБ у відповідності до теореми Байєса, то запишемо результат, який має таке ж значення для ентропії, як і теорема Байєса для ймовірностей. Так, спільна ентропія для двох випадкових змінних X і Y задовольняє співвідношенню:

$$h(X, Y) = h(X | Y) + h(Y), \quad (2)$$

де $h(X | Y)$ – умовна ентропія змінної X по відношенню до Y , яка визначається за виразом:

$$h(X | Y) = \sum_j p(y_j) h(X | y_j) = - \sum_j p(y_j) \sum_i p(x_i | y_j) \log[p(x_i | y_j)]. \quad (3)$$

З властивості комутативності кон'юнкції $(X \wedge Y)$, тобто $h(X, Y) = h(Y, X)$, випливає, що:

$$h(X | Y) = h(Y | X) + h(X) - h(Y). \quad (4)$$

Згідно з прийнятою концепцією $h(X)$ представляє апіорну невизначеність щодо X , тобто невизначеність знання щодо змінної X при відсутності іншої інформації, а $h(X, Y)$ – апостеріорна невизначеність щодо X при умові, що Y прийняла деяке значення. Таким чином, (4) вказує на зв'язок між апіорною та апостеріорною ентропією; можна показати, що:

$$h(X) \geq h(X | Y). \quad (5)$$

Рівність у (5) можлива тільки у випадку, коли X і Y повністю незалежні. Можна стверджувати, що розповсюдження ймовірностей (довіри) по мережі в середньому приводить до зменшення ентропії. Однак, справедливості цього твердження у середньому означає, що $h(X | Y = y)$ не завжди буде меншою $h(X)$; можливі випадки, коли $h(X | Y = y) > h(X)$. Іншими словами, отримання нової інформації може призвести до зростання невизначеності (наприклад, при оцінюванні типу ситуації), але в середньому нова інформація завжди зменшує ступінь невизначеності.

Аналіз впливу нової інформації на змінну, щодо якої формулюється гіпотеза

Нехай МБ містить змінну $X = \{x_1, \dots, x_n\}$, відносно якої формулюється гіпотеза, та інформаційну змінну $E_i \{e_{i1}, \dots, e_{id}\}$. При появі нового значення $E_i = e_{i1}$ інформація розповсюджується по мережі, що приводить до зміни розподілу X на $p(x_i | e_{i1})$. Ентропія змінної X стає рівною $h(X | e_{i1})$. Напрямок зміни цієї ентропії залежить від наступних факторів: (1) значення апіорних ймовірностей $p(x_i)$; (2) рівня знань, накопичених у МБ в термінах умовних ймовірностей (ці умовні ймовірності відіграють ключову роль у формуванні висновку на основі МБ). Постає питання визначення ефективності механізму формування висновку у МБ щодо зменшення невизначеності за допомогою нової інформації. Це можна зробити, якщо відокремити вплив апіорних ймовірностей від механізму формування висновку. Один із простих підходів до розв'язання цієї задачі полягає у тому, що припускається відсутність апіорної інформації відносно ключової змінної, щодо якої формується гіпотеза. Це дає можливість встановити ступінь впливу нової інформації на початкову невизначеність.

Якщо інформація щодо ключову змінну $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ відсутня, то за принципом максимальної ентропії $p(x_i) = 1/n, \forall i$, а апіорна ентропія складає $h(X) = \log n$. При надходженні інформації $E_1 = e_{1j}$ ентропія зменшується на величину:

$$\Delta h_{e_{1j}} = \log n - h(X | E_1 = e_{1j}). \quad (6)$$

Апостеріорні ймовірності $p(x_i | e_{1j})$ розраховуються на основі апіорних ймовірностей $p(x_i) = 1/n, \forall i$. Оскільки $\log n$ – максимально можлива ентропія, то вираз (6) завжди додатний. В зв'язку з цим вираз (6) можна назвати *ступінню редукації невизначеності* за рахунок інформації $E = e_1$. Якщо $\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$ – нова інформація, яка представлена декількома значеннями $[e_{1i}, e_{2j}, \dots, e_{mk}]$, отриманими з різних джерел, то ступінь зменшення невизначеності можна визначити як

$$\Delta h = \log n - h(X | E_1 = e_{1i}, E_2 = e_{2j}, \dots, E_m = e_{mk}).$$

Аналіз задачі оцінювання зменшення невизначеності при надходженні нової інформації в межах мережі Байєса приводить до трьох наступних випадків:

1. Нехай X – коренева змінна і по відношенню до неї формулюється гіпотеза. Присвоїмо цій та іншим кореневим змінним розподіл, який забезпечує однакову ймовір-

ність появи всіх можливих значень. Після досягнення мережею рівноваги при таких початкових умовах одній або більше інформаційним змінним задамо відповідне значення. Апостеріорні ймовірності $p(x_i | e_{1i}, e_{2j}, \dots, e_{mk})$ розрахуємо після того, як мережа знову досягне стану рівноваги. Ступінь зменшення невизначеності завдяки появі нової інформації можна обчислити на основі апіорних та апостеріорних ймовірностей.

2. Якщо змінна X , по відношенню до якої формулюється гіпотеза, не коренева, то вилучаємо з мережі її батьківські вузли (змінні) і реалізуємо процедуру, описану в п. 1.

3. Можлива ситуація, коли нова інформація впливає на X через один з її батьківських вузлів, наприклад Y . В такому випадку вилучення батьківських вузлів призведе до виникнення розриву на шляху розповсюдження нової інформації до X . Оскільки нова інформація впливає безпосередньо на Y і тільки опосередковано впливає на X , то будемо вважати Y первинною змінною, щодо якої формулюється гіпотеза, і будемо розглядати її апіорні ймовірності замість X . Іншими словами, якщо Y – коренева змінна, то ми розглядаємо всі її стани як рівноймовірні (як у першому випадку), а якщо Y – не коренева змінна, то поступаємо так, як у другому випадку. Оскільки Y – батьківська змінна для X , то встановлення апіорних ймовірностей для Y автоматично приведе до встановлення апіорних ймовірностей для X .

Приклад розрахунку ймовірностей. Розглянемо МБ, побудовану для розв'язання задачі ситуаційного аналізу. За цільову змінну, щодо якої формулюється гіпотеза, виберемо змінну „активність”. Розрахуємо ступінь зменшення невизначеності щодо змінної діяльність з надходженням нової інформації від інформаційних змінних „позиція” та „мобільність”. Зв'язок між вузлами „активність” та „намір ворога” (батьківський вузол) роз'єднано, в результаті чого вузол „активність” став кореневим. Оскільки всі стани вузла „активність” мають таку ж апіорну ймовірність, що і раніше, то маємо максимальну апіорну невизначеність:

$$h(\text{активність}) = \log 6 = 2,5849 \text{ біт.}$$

Рис.2 ілюструє ситуацію, коли надходить така інформація:

Значення позиції (SPI):= поповнення амуніції,

Значення мобільності (SMI):= повільне паралельне просування.

Умовні ймовірності можна визначити з вузла „активність”, що приводить до такої умовної ентропії:

$$\begin{aligned} h(\text{активність} | \text{SPI} = \text{поповнення амуніції}, \text{SMI} = \text{повільне парал. просування}) = \\ = -0,1024 \log 0,1024 - 0,276 \log 0,276 - 0,0224 \log 0,0224 - 0,484 \log 0,484 - \\ - 0,0365 \log 0,0365 - 0,0784 \log 0,0784 = 1,9410. \end{aligned}$$

Таким чином, ступінь зменшення невизначеності за рахунок надходження згаданої нової інформації складає: $\Delta h = 2,5849 - 1,9410 = 0,6439 \text{ біт.}$

Аналіз впливу оновлення ймовірності

Хоча зменшення невизначеності – це основна причина збору інформації, в мережі протікають інші тонкі інформаційні процеси, які відіграють вирішальну роль у процесі прийняття рішень щодо наступних дій. Якщо розподіл ймовірностей для змінної X , щодо якої формулюється гіпотеза, такий, що $p(x_i) \rightarrow 1$ для деякого x_i , то із значною мірою впевненості можна стверджувати, що поточна ситуація визначається значенням x_i . Однак такі випадки є досить рідкісними. Якщо змінна X має велике число станів, то значну роль відіграє тип розподілу. Фактично форма розподілу визначає нашу довіру до ідентифікації конкретної ситуації. Крім того, в динамічній постановці задачі характер ситуації буде змінюватись у часі. Можливо, що нові спостереження ніколи не нададуть точного описання ситуації, але послідовність розподілу ймовірностей, яку ми отримуємо з надходженням нової інформації, повинна інформувати нас щодо того, як змінюється ситуація.

Кількісне описання ситуативних змін можна отримати таким чином. Нехай в деякий момент t_1 значення змінної X мають розподіл p_1 . В момент t_2 надходять нові значення спостережень, які формують розподіл p_2 ; припустимо, що цієї нової інформації досить для визначення змін в поточній ситуації. Потрібно визначити – наскільки гіршою буде ефективність прийнятого рішення у випадку, якби нова інформація не надійшла? Тобто без нової інформації рішення буде ґрунтуватись на розподілі p_1 при фактичному розподілі p_2 . Оскільки фактичним розподілом X буде p_2 , то невизначеність ситуації визначається за виразом:

$$- \sum_i p_2(x_i) \log p_1(x_i),$$

що відрізняється від значення $-\sum_i p_2(x_i) \log p_2(x_i)$, яке є мірою невизначеності у випадку отримання нової інформації. Таким чином, збільшення невизначеності внаслідок не-отримання нової інформації визначається за виразом [19, 20]:

$$D(p_2 \| p_1) = - \sum_i p_2(x_i) \log p_1(x_i) + \sum_i p_2(x_i) \log p_2(x_i). \quad (7)$$

Вираз (7) – це відстань Кульбака між розподілами p_2 і p_1 , яка є завжди додатньою. Необхідно відзначити, що ступінь невизначеності, характерний для оновленого розподілу p_2 , може бути більшим ніж для p_1 . Це свідчить про те, що отримання нової інформації не завжди зменшує невизначеність, але без оновлення неможливо рухатися вперед.

Аналіз ефективності приладів збору даних

Розглянемо спочатку коцепцію взаємної інформації, яка буде використана для аналізу ефективності приладів для збору даних. Взаємна інформація для двох випадкових змінних X і Y визначається так [20]:

$$I(X;Y) = \sum_i \sum_j p(x_i, y_j) \log \frac{p(x_i, y_j)}{p(x_i) p(y_j)}. \quad (8)$$

Можна також показати, що

$$I(X;Y) = I(Y;X), \quad (9)$$

$$i \quad I(X;Y) = h(X) - h(X | Y) = h(Y) - h(Y | X). \quad (10)$$

Тобто взаємна інформація – це об’єм інформації, який містить змінна Y щодо X . Іншими словами, $I(X;Y)$ показує наскільки, в середньому, випадкова змінна Y зменшує невизначеність, що міститься в X .

Розглянемо просту мережу, яка містить елементи, необхідні для аналізу ефективності приладів збору даних (рис. 1).

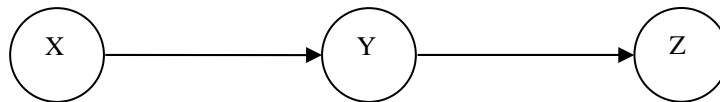


Рис. 1 Проста мережа Байєса: X – змінна, щодо якої формулюється гіпотеза; Y – інформаційна змінна; Z – вузол, який означає прилад для отримання інформації.

Гіпотеза щодо змінної $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ оцінюється на основі інформації, що забезпечується змінною Y , а $Y = \{y_1, \dots, y_d\}$ отримує дані від приладу $Z = \{z_1, \dots, z_d\}$. Очевидно, що змінні

Y і Z мають однакові стани, наприклад, Y може приймати значення „розташування”, а Z – прилад для визначення типу „розташування”. Якщо прилад працює надійно, то його перехід в стан $Z = z_1$ приводить до переходу Y у відповідний стан $Y = y_1$ з одиничною ймовірністю:

$$p(z_i | y_i) = \delta_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, d, \quad (11)$$

де $\delta_{ij} \rightarrow 0, i \neq j$ і $\delta_{ii} \rightarrow 1$, тобто $\delta_{ii} = 1 - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^d \delta_{ij}$, а маржинальні ймовірності $p(y)$ і $p(z)$

зв'язані так: $p(z_i) = \sum_{j=1}^d \delta_{ij} p(y_j)$. Для ідеального приладу $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$. Іншими словами,

між змінні Y і Z зв'язані зашумленим інформаційним каналом. Наявність шумового фактору відображається умовними ймовірностями $p(z_i | y_j)$. Зв'язок між X і Y , який квантується умовними ймовірностями $p(y_i | x_j)$, представляє знання, які використовуються для формування висновку щодо X .

При апіорних ймовірностях $p(x_i)$ змінної X початкова невизначеність гіпотези визначається за виразом: $h(X) = -\sum_i p(x_i) \log p(x_i)$. Апостеріорна невизначеність гіпотези у випадку, якщо прилад приймає стан $Z = z_s$, складає:

$$h(X | z_s) = -\sum_i p(x_i | z_s) \log p(x_i | z_s), \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \text{де} \quad p(x_i | z_s) &= \frac{\sum_k p(x_i, y_k, z_s)}{p(z_s)} = \frac{\sum_k p(z_s | y_k) p(y_k | x_i) p(x_i)}{p(z_s)} = \\ &= \frac{\sum_k \delta_{sk} p(y_k | x_i) p(x_i)}{\sum_k \delta_{sk} p(y_k)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Оскільки для ідеального приладу $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$, то отримаємо:

$$p(x_i | z_s) = \frac{p(y_s | x_i) p(x_i)}{p(y_s)} = p(x_i | y_s). \quad (14)$$

Таким чином, для ідеального приладу маємо:

$$\begin{aligned} h(X | Z) &= -\sum_s p(z_s) \sum_i p(x_i | z_s) \log p(x_i | z_s) = \\ &= -\sum_s p(y_s) \sum_i p(x_i | y_s) \log p(x_i | y_s). \end{aligned} \quad (15)$$

Використовуючи властивість незалежності вузлів МБ, можна показати, що ступінь зменшення невизначеності приладом Z

$$I(X; Z) \leq I(X; Y). \quad (16)$$

Оскільки для ідеального приладу виконується рівність $I(X; Z) = I(X; Y)$, то він зменшує невизначеність щодо X на $I(X; Y)$. Якщо надійність приладу менша одиниці, то його здатність зменшувати невизначеність погіршиться на величину:

$$\Delta I = I(X; Y) - I(X; Z). \quad (17)$$

Тобто менше значення ΔI свідчить про вищу ефективність приладу. В загальному випадку ефективність приладів (датчиків інформації) можна оцінити так:

- прийняти X за кореневий вузол з апіорними ймовірностями $p(x_i)$;

- задати Z – його можливі стани і обчислити $I(X;Z)$; умовні розподіли X , обчислені для кожного значення $z_i, i = 1, \dots, d$, використати для оцінювання умовної ентропії $h(X|Z)$, а за виразом (8) обчислити $I(X;Z)$; аналогічно обчислити $I(X;Y)$.

Ефективність мережі Байєса

Розглянемо МБ, яка складається з n вузлів (рис. 2). Кореневий вузол X_1 представляє змінну, щодо якої формулюється гіпотеза, а вузли без нащадків представляють $r + 1$ інформаційну змінну: $X_{n-r}, \dots, X_{n-1}, X_n$. Всі інші вузли – проміжні, вони допомагають передавати інформацію (свідчення) від інформаційних змінних до головної, для якої формулюється гіпотеза.

Структура мережі вважається встановленою, якщо визначено число вузлів та зв'язки між ними. Надалі необхідно визначити умовні ймовірності, які встановлюють кількісний рівень зв'язків між вузлами, тобто визначають функціональну структуру мережі. Отримання нової інформації від інформаційних змінних дає можливість оцінювати та оновлювати розподіл ймовірностей для основної змінної X_1 .

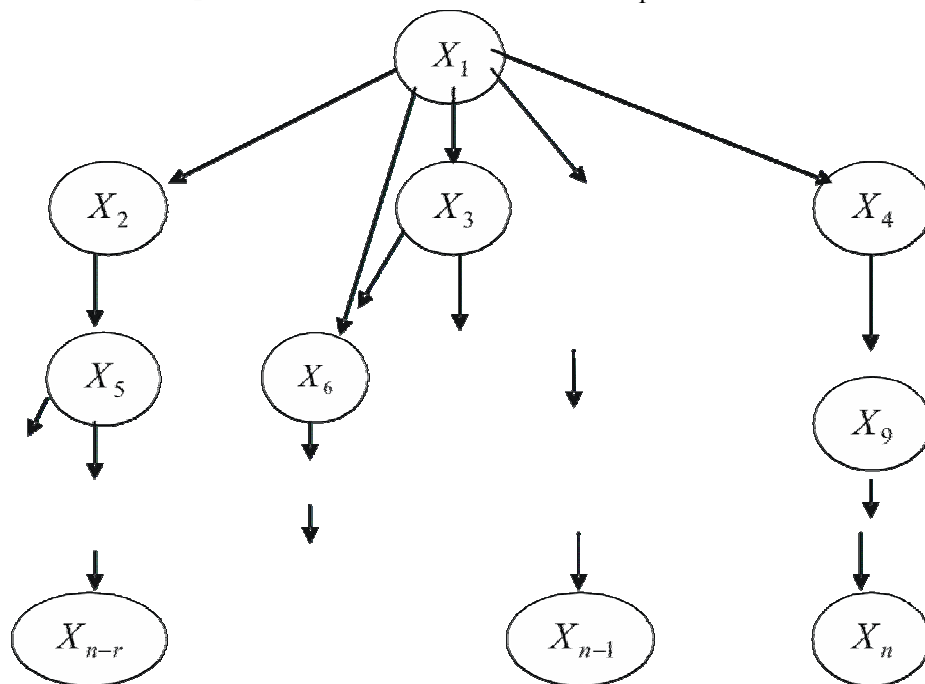


Рис. 2. Узагальнена структура МБ з однією змінною, щодо якої формулюється гіпотеза та множиною інформаційних змінних

Припустимо, що випадкова змінна X_k приймає значення на множині $\{x_{k_1}, \dots, x_{k_m}\}$. Позначимо через $H(X_k) = -\sum_{x_k} p(x_k) \log p(x_k)$, тобто додавання тут виконується по всіх значеннях $\{x_{k_1}, \dots, x_{k_m}\}$. Ефективність МБ визначається її здатністю використовувати інформацію, що надходить в процесі функціонування об'єкта, що моделюється, для оновлення розподілу основної змінної. Очевидно, що така здатність МБ визначається коректністю функціональної специфікації, яка визначає ступінь впливу інформаційних змінних на основну. Таким чином за міру ефективності можна вибрати міру цього впливу, яка може бути встановлена за допомогою взаємної інформації:

$$I(X_1; X_n, \dots, X_{n-r}) = H(X_n, \dots, X_{n-r}) - H(X_n, \dots, X_{n-r} | X_1). \tag{18}$$

Для конкретного значения $p(x_i | y_i)$ випадкових змінних X і Y взаємна інформація $I(X; Y) \in$ увігнутою функцією від $p(x_i)$. Аналогічний результат можна отримати і для МБ. Розглянемо першу складову у правій частині рівняння (18):

$$H(X_n, \dots, X_{n-r}) = - \sum_{x_n, \dots, x_{n-r}} p(x_n, \dots, x_{n-r}) \log p(x_n, \dots, x_{n-r}), \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \text{де } p(x_n, \dots, x_{n-r}) &= \sum_{x_1, \dots, x_{n-r-1}} p(x_n, \dots, x_2, x_1) = \\ &= \sum_{x_1, \dots, x_{n-r-1}} p(x_n | ba(x_n)) \times p(x_{n-1} | ba(x_{n-1})) \times \dots \times p(x_2 | ba(x_2)) \times p(x_1); \end{aligned} \quad (20)$$

$ba(X_i)$ – множина батьківських вузлів для вузла X_i [21]. Вираз (20) записано із врахуванням умовної незалежності змінних, характерною для структури МБ. Оскільки умовні ймовірності $p(x_i | ba(x_i))$ представляють собою постійні значення, то $p(x_n, \dots, x_{n-r}) \in$ лінійною функцією від $p(x_1)$. Таким чином, ентропія $H(X_n, \dots, X_{n-r})$, яка \in увігнутою функцією від $p(x_n, \dots, x_{n-r})$, буде також увігнутою функцією від $p(x_1)$.

Для другого члена у правій частині (19) можна записати:

$$H(X_n, \dots, X_{n-r}) = - \sum_{x_1} p(x_1) \sum_{x_n, \dots, x_{n-r}} p(x_n, \dots, x_{n-r} | x_1) \log p(x_n, \dots, x_{n-r} | x_1). \quad (21)$$

З іншого боку

$$\begin{aligned} p(x_n, \dots, x_{n-r} | x_1) &= \frac{p(x_n, \dots, x_{n-r}, x_1)}{p(x_1)} = \frac{\sum_{x_2, \dots, x_{n-r-1}} p(x_n, \dots, x_2, x_1)}{p(x_1)} = \\ &= \frac{\sum_{x_2, \dots, x_{n-r-1}} p(x_n | ba(x_n)) \times p(x_{n-1} | ba(x_{n-1})) \times \dots \times p(x_2 | ba(x_2)) \times p(x_1)}{p(x_1)} = \\ &= \sum_{x_2, \dots, x_{n-r-1}} p(x_n | ba(x_n)) \times p(x_{n-1} | ba(x_{n-1})) \times \dots \times p(x_2 | ba(x_2)). \end{aligned} \quad (22)$$

Таким чином, після визначення умовних ймовірностей $p(x_i | ba(x_i))$ величина $p(x_n, \dots, x_{n-r} | x_1)$ залишається фіксованою, а ентропія $H(X_n, \dots, X_{n-r} | X_1)$ – лінійна функція $p(x_1)$. Оскільки $I(X_1; X_n, \dots, X_{n-r})$ – це різниця між увігнутою функцією від $p(x_1)$ і лінійною функцією від $p(x_1)$, то вона буде увігнутою функцією від $p(x_1)$.

Якщо змінна, щодо якої формулюється гіпотеза, може приймати h альтернатив, тобто $X_1 = \{x_1, \dots, x_h\}$, то розподіл ймовірностей $p(X_1)$ визначається числами: $\{p(x_1), \dots, p(x_h)\}$. Множина усіх таких функцій розподілу утворює симплекс вимірності h в просторі R^h , який визначається співвідношеннями: $0 \leq p(x_i) \leq 1, i = 1, 2, \dots, h$ та $\sum_{i=1}^h p(x_i) = 1$. А різниця $I(X_1; X_n, \dots, X_{n-r})$ – увігнута функція, визначена на цьому симплексі. Таким чином, існує така зв'язана підмножина S цього симплексу, на якій взаємна інформація \in константою, що відповідає глобальному максимуму. Тобто, якщо S – одна точка, то функція $I(X_1; X_n, \dots, X_{n-r})$ має єдиний глобальний максимум у цій точці.

Априорний розподіл ймовірностей $p(X_1)$ для змінної, щодо якої формулюється гіпотеза, відображає характер поточної ситуації на будь-якому етапі прийняття рішень. Зміна ситуації приводить до зміни параметрів розподілу на розглянутому вище симплексі. Можна зробити такий висновок: якщо $p(X_1)$ належить множині S , то функціонально визначена мережа дає можливість максимально використати всю інформацію, яка була зібрана на поточний момент. По мірі того як розподіл $p(X_1)$ зміщується по відношенню до

S , відображаючи тим самим еволюцію ситуації, здатність мережі Байеса використовувати нову інформацію зменшується. Для того щоб повернутись до оптимального режиму роботи необхідно змінити її функціональну специфікацію таким чином, щоб розподіл $p(X_1)$ став частиною множини S або знаходився на її границі.

Така зміна потребує виконання наступних дій (однієї або обох):

- змінити множину спостережуваних змінних таким чином, щоб зібрана інформація мала вищу ступінь наближення до явно вираженої ситуації;
- змінити положення проміжних вузлів i , тим самим, зв'язки між елементами мережі таким чином, щоб розповсюдження свідчень (інформації) по мережі краще відповідало новій поточній ситуації.

Необхідно підкреслити, що увігнутість функції $I(X_1; X_n, \dots, X_{n-r})$ – це важливий факт, який свідчить про те, що МБ є самою ефективною по відношенню до деякої унікальної ситуації або множини ситуацій, що відповідають унікальній точці або зв'язаній області ймовірнісного симплексу. Також необхідно підкреслити, що МБ часто має суб'єктивну природу, вона відображає процес прийняття рішення конкретною особою. В зв'язку з цим природно виникає запитання: чи є цей процес ефективним та внутрішньо консистентним? Чи коректно відображає створений ланцюжок причинних зв'язків дійсний перебіг ситуацій? На ці запитання можна дати стверджувальну відповідь, якщо взаємна інформація $I(X_1; X_n, \dots, X_{n-r})$ приймає максимальне значення в точці ймовірнісного симплексу, яка наближається до точки, що відповідає поточній ситуації. Якщо ж ці точки знаходяться далеко одна від одної, то суб'єктивний процес створення мережі був неефективним і, можливо, внутрішньо неконсистентним.

Висновки

Графічні моделі у вигляді мереж Байеса представляють собою зручний і важливий інструмент аналізу невизначеностей різної природи. Представлення моделі процесу у вигляді графу дає можливість швидкого осмислення ситуацій і наглядного представлення взаємодії елементів (змінних). При розробці моделі процесу виконується розв'язка якісних аспектів від кількісних. Це дає можливість спочатку зосередитись на побудові причинної структури мережі, не беручи до уваги ймовірнісні аспекти. При цьому необхідно тільки чітко розуміти причини та можливі наслідки тих чи інших дій. На другому етапі побудови МБ необхідно визначити умовні ймовірності для зв'язків. Для розв'язку цієї задачі можна скористатись статистичними даними (якщо це можливо) або суб'єктивними знаннями експертів. Очевидно, що обидва способи потребують додаткових досліджень.

The effectiveness of Bayes network functioning is considered from the point of view of uncertainties distribution across the network. A criterion for quantitative analysis is given for estimation of information volume that is distributed between the elements of a network. Also recommendations are given to construct a network structure.

1. Long W. Medical diagnosis using a probabilistic causal network // Applied Artificial Intelligence. – 1989. – № 3. – P. 367-383.
2. Charniak E. The Bayesian analysis of common sense medical diagnosis / Proceedings of the American Association Conference on Artificial Intelligence. – 1993. – P. 70-73.
3. Bioch J.C., van der Meer O., Potharst R. Classification using Bayesian neural networks / Proceedings Benelarn'95, Brussel University. – 1995. – P. 79-90.
4. Milho I., Fred A., Albano J., Baptista N., Sena P. An Auxiliary system for medical diagnosis based on Bayesian belief networks / <http://www.lx.it.pt>, 2000. – 6 p.
5. Korrapathi R., Mukherjee S., Chalam K.V. A Bayesian framework to determine patient compliance in glaucoma cases / <http://www.adams.mgh.harvard.edu>, 2004. – 1 p.

6. Kjerulff U. Constructing Bayesian Networks / Report of Reykjavik University, April, 2005. – 77 p.
7. Nelson D.J. Finding useful questions: on Bayesian diagnosticity, probability, impact, and information gain // Psychological Review, 2005. – Vol. 112, № 4. – P. 979-999.
8. Huang K., Yang H., King I., Lyu Mr. Maximizing sensitivity in medical diagnosis using biased minimax probability machine // IEEE Transaction on Biomedical Engineering, 2006. – Vol. 53, № 5. – P. 821-831.
9. Lerner U., Parr R., Koller, D., Biswas G. Bayesian fault detection and diagnosis in dynamic systems / 17 National Conference on Artificial Intelligence, 2000. – 7 p.
10. Garg S. Controls and health management technologies for intelligent aerospace propulsion systems / NASA-TM, 2004. – 212915. – 28 p.
11. Leray Ph. Apprentissage diagnostic de systemes complexes: reseaux de neurones et reseaux Bayesiaens / de Universite Paris 6, PhD Thesis, 1998. – 180 p.
12. Portinale L., Bobbio A. Bayesian networks for dependability analysis: an application to digital control reliability / 17 National Conference on Artificial Intelligence, 2000. – 10 p.
13. Cheng J., Greiner R. Learning Bayesian belief network classifiers: algorithms and system / Canadian conference on artificial intelligence (CSCSI01), 2001. – P. 141-151.
14. Stephenson T.A., Bourlard H., Bengio S., Morris A.C. Automatic speech recognition with both acoustic and articulatory variables / 6 International conference on spoken language processing, Beijing, October, 2000. – P. 951-954.
15. Rossi P.E., Allenby G.M. Bayesian statistics and marketing // Marketing Science, 2003. – Vol. 22, № 3. – P. 304-328.
16. Бідюк П.І. Оцінювання і прогнозування стану малого підприємства за допомогою мережі Байєса // Наукові праці Миколаївського державного гуманітарного університету ім. Петра Могили, 2005. – Вип. 44. – С. 7-29.
17. Niedermayer D. An Introduction to Bayesian networks and their contemporary applications / <http://www.niedermayer.ca>, 2006. – 13 p.
18. Robinson R.W. Counting unlabeled acyclic digraphs / Proceedings of The Fifth Australian Conference on Combinatorial Mathematics, Melbourne, Australia, 1976. – P. 28-43.
19. Терентьев А.Н., Бидюк П.И. Эвристический метод построения байесовских сетей / Міжнародна НТК „Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень та прикладні аспекти сучасних інформаційних технологій. – Євпаторія, травень 2006. – т. 1, С. 401-403.
20. Chow C.K., Liu C.N. Approximating discrete probability distributions with dependence trees. // IEE Transactions on information theory, May 1968. – Vol. IT-14, № 3. – 6 p.
21. Бидюк П.И., Терентьев А.Н., Гасанов А.С. Построение и методы обучения Байесовских сетей // Кибернетика и системный анализ, 2005. – 4, – С. 133 – 147.
22. Алемов С.В., Бардачев Ю.Н. Литвиненко В.И.Фефелов А.А.,Сташенко А.А., Шерстюк, В.Г. Стешенко О.А. Использование байесовских сетей для оценки санитарного состояния объектов //Моделювання та керування станом еколого-економічних систем регіону .– Випуск 3,2006 с.14.-26
23. Бидюк П.И., Литвиненко В.И. Фефелов А.А., Шерстюк В.Г., Тригуб С.Н. Алгоритмы классификации на основе байесовских сетей //Збірник наукових праць у пяти томах другої міжнародної наукової конференції Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій/ Євпаторія 2006,Том 2, с.177-183.
24. Фефелов А.А., Бидюк П.И., Литвиненко В.И. Использование иммунных алгоритмов для приближенного расчета маргинальных вероятностей в задаче вывода суждений из Байесовских сетей// Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць – Випуск 6(47). Дніпропетровськ, 2006. – с.235-244.

УДК 622.673.8

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИВИЗНЫ КОНТАКТИРУЮЩИХ ТЕЛ НА УГОЛ СМАЧИВАНИЯ ЖИДКОСТИ В МЕЖЧАСТИЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Исаев Е.А., Наговский Д.А.

Данная статья посвящена исследованию влияния кривизны контактирующих тел на угол смачивания. Материалы статьи могут быть использованы для построения математических моделей процессов, связанных с влагой, увлажнению каких либо частиц. Для простоты изъяснения сразу же введем конкретный пример: окомкование сыпучих материалов. Оптимизация данного процесса играет немаловажную роль в промышленности Украины в виду обеднения руд. Основным влияющим фактором в процессе окомкования является влажность сырья. Поэтому имеет смысл исследовать степень увлажненности частиц для определения силы их сцепления.

Постановка задачи. Исследовать влияние кривизны контактирующих тел на угол смачивания с целью дальнейшего использования полученных результатов для построения математических моделей процессов, связанных с увлажнением материала.

Равновесный угол Θ_0 является одной из важнейших характеристик смачивания твердой поверхности при контакте жидкости и твердого тела [1].

На величину равновесного краевого угла смачивания определенное влияние имеет кривизна жидкостной манжеты при контакте двух сферических частиц с значительным (по отношению к объекту твердых частиц) количеству воды в точке контакта. При этом равновесный краевой угол изменяется.

Определение величины равновесного краевого угла смачивания наиболее точно отражается в уравнении, основанном на минимуме свободной энергии системы «твердое тело-жидкость-газ» в состоянии равновесия по выражению:

$$F_n = \sigma_{ТГ} \cdot \omega_{ТГ} + \sigma_{ТЖ} \cdot \omega_{ТЖ} + \sigma_{ЖГ} \cdot \omega_{ЖГ}, \quad (1)$$

где $\sigma_{ТГ}, \sigma_{ТЖ}, \sigma_{ЖГ}$ - поверхностные натяжения на границах соответствующих фаз;

$\omega_{ТГ}, \omega_{ТЖ}, \omega_{ЖГ}$ - площади поверхности раздела фаз, участвующих в смачивании. В случае рассмотрения капли смачивающей жидкости на гладкой однородной и твердой поверхности, выражение (1) представляется в виде

$$\frac{\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}}{\sigma_{ЖГ}} = \cos \Theta_0, \quad (2)$$

где Θ_0 – равновесный краевой угол смачивания, для определенного вида материала и жидкости есть величина постоянная.

При получении математической модели связывающей геометрически параметры твердых тел различной кривизны с величиной угла смачивания Θ мы использовали (1).

Рассмотрим вышеназванную систему геометрически, представив каплю жидкости в виде твердого тела, т.е. выражение (1) можно привести к виду

$$\frac{\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}}{\sigma_{ЖГ}} = \frac{d\omega_{ЖГ}}{d\omega_{ТЖ}}, \quad (3)$$

В случае контакта сферических или других частиц между собой, или сферической частицы и плоскости с прослойкой жидкости в точке контакта, равновесный краевой угол, по нашему мнению, изменяет свою величину в зависимости от геометрии смачиваемых и контактирующих поверхностей, и правая часть выражения (2) становится функцией некоторого угла θ , не равного Θ_0 . Мы допускаем, что кольцевая жидкостная манжета в своем

сечении имеет форму близкую к окружности. Тогда, используя рис. 1,а можно записать уравнение

$$[(r_1 + r_2') - x]^2 + y^2 = r_2'^2 \quad (4)$$

Откуда

$$x = r_1 + r_2' - \sqrt{r_2'^2 - y^2}.$$

Наружную поверхность смачивающей жидкости найдем из следующего выражения

$$\omega_{жг}^{(1)} = 4 \cdot \pi \cdot \int_0^{AH} x(y) \sqrt{1 + (x')^2} dy, \quad (5)$$

где

$$AH = r_2' \cdot \sin \psi.$$

Подставив (4) в (5), после преобразований получим

$$\omega_{жг}^{(1)} = 4 \cdot \pi \cdot r_2' [(r_1 + r_2') \cdot \psi - r_2' \sin \psi]. \quad (6)$$

Здесь $\omega_{жг}^{(1)}$ - поверхность жидкость - газ для двух сфер одинакового диаметра

Из (6) при $\psi = const, r_1 \neq f(r_2')$

$$d\omega_{жг}^{(1)} = 8 \cdot \pi \cdot \left[\frac{r_1}{2} \psi + r_2' (\psi - \sin \psi) \right] dr_2'.$$

С другой стороны, уравнение поверхностей, контактирующих с жидкостью, записывается в виде

$$\omega_{жг}^{(1)} = 4\pi R_1 r_2' \cdot \sin \psi,$$

откуда

$$d\omega_{жг}^{(1)} = 4\pi R_1 \cdot dr_2' \cdot \sin \psi.$$

Используя (2), запишем для нашего случая

$$\frac{\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}}{\sigma_{жг}} = \frac{2 \left[\frac{r_1}{2} \psi + r_2' (\psi - \sin \psi) \right]}{R_1 \cdot \sin \psi} = f(\Theta_0), \quad (7)$$

Выражение (7) связывает значение функции краевого угла смачивания Θ с поверхностным натяжением на границах раздела фаз с учетом формы контактирующих частиц и объема жидкостной прослойки.

С другой стороны, значение угла смачивания Θ характеризует способность двух частиц образовывать устойчивый микроагрегат за счет сил капиллярного разрежения

$$F = 4\pi\sigma_{жг} \cdot \left[r_1 \cdot a + R(1 - \sqrt{1 - a^2}) \cdot b - R \frac{b}{a} \arcsin a + \frac{\sqrt{1 - a^2}}{2} \cdot R(\cos \Theta \cdot \sqrt{1 - a^2} - \sin \Theta \cdot a) \right],$$

где

$$a = \sin \psi; b = 1 - \sin \Theta \cdot \sqrt{1 - a^2} - a \cos \Theta.$$

Сопоставив выражения (3) и (7), а также проанализировав последнее отметим, что в области контакта изменяется соотношение между $\sigma_{жг}, \sigma_{ТЖ}, \sigma_{ТГ}$, т.е. изменение геометрии твердых поверхностей и объема жидкостной прослойки, по нашему мнению, эквивалентно лиофильности жидкости, контактирующей с твердой поверхностью, харак-

теризующейся равновесным краевым углом смачивания Θ . Исходя из изложенного, подставив выражение для определения силы сцепления между частицей сферической формы и плоскости (рис. 1,б)

$$F_{cy} = 2\pi\sigma \left\{ r_1 (\sin \psi' + \cos \Theta) + r_2 \left[\sin \psi' (1 - \cos \psi') - \psi' + \cos \Theta (1 - \sin \Theta) - \frac{\pi}{2} + \Theta \right] \right\},$$

где

$$\sin \psi' = \frac{2(1 + \frac{b}{2R} + \sin \Theta)(\cos \Theta - \frac{r_1}{R})}{(1 + \frac{b}{2R} + \sin \Theta)^2 + (\cos \Theta - \frac{r_1}{R})};$$

$$r_2' = \frac{R[1 - \sin(\Theta + \psi')] + \frac{b}{2}}{\sin \psi'}$$

в (7), можно получить степень влияния формы частиц количества жидкости в точке контакта на значение угла смачивания Θ для различных по лиофильным свойствам жидкостей.

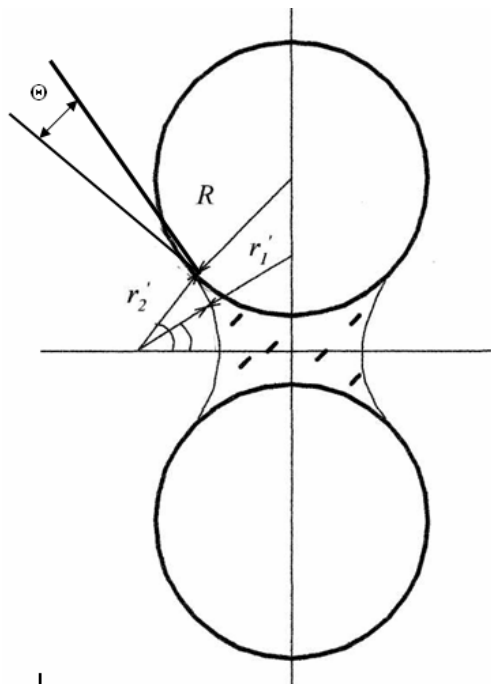


Рис. 1,а Взаимодействие частиц одинаковых размеров

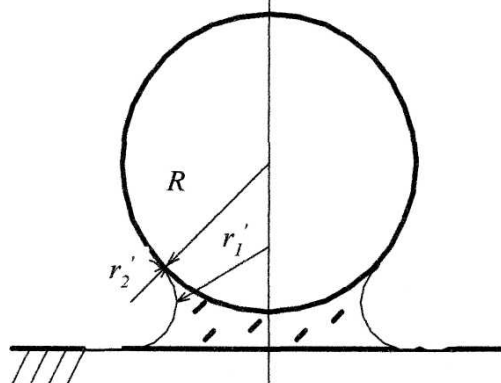


Рис. 1,б Взаимодействие частицы с плоскостью

Отметим, что изложенные теоретические исследования не противоречат с физическими представлениями о капиллярном взаимодействии различных по характеру кривизны поверхностей, рассмотренных, например, в [2].

Зависимость $\Theta = f(r1/R1)$, полученная из (7), представлена на рис. 2.

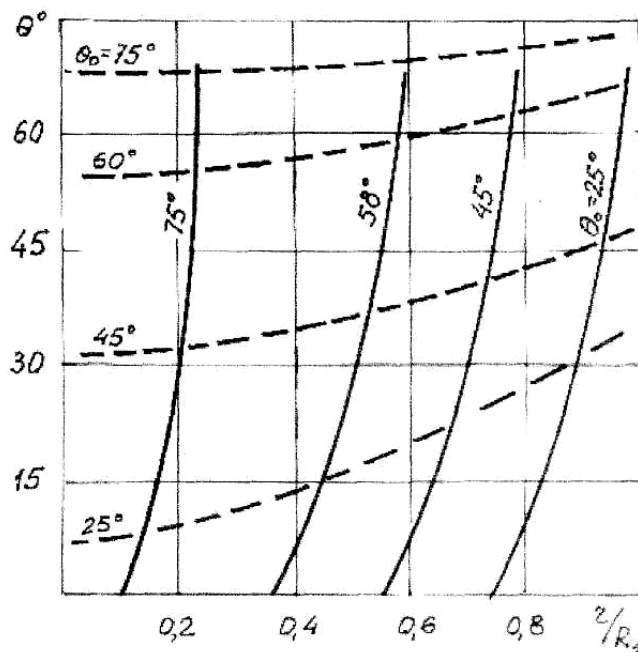


Рис. 2 Зависимость краевого угла смачивания Θ в функции кривизны поверхностей контактирующих тел и равновесного угла Θ_0 .

- - сферы одинакового размера;
 - - - - сферы и плоскости.

Анализ этого рисунка показывает, что при угле $\Theta_0 < 25^\circ \dots 20^\circ$ геометрия поверхности частиц не оказывает существенного влияния на угол смачивания Θ при различной влажности материала ($r1/R1$). Если равновесный угол смачивания жидкости находится в пределах $20^\circ < \Theta_0 < 75^\circ$, то угол Θ , а равно и способность к окомкованию, в большей степени зависит от количества жидкости в точке контакта. При этом, например, для угла $\Theta_0 > 60^\circ$ жидкости должно быть не более, чем $(r1/R1) = 0,36$, в противном случае незначительное увеличение количества жидкости (до $(r1/R1) = 0,5$) приводит к возрастанию угла смачивания Θ с 15° до 60° , что ухудшает условия окомкования материала. При $\Theta_0 > 75^\circ$ окомкование практически невозможно даже при $(r1/R1) = 0,1$. Таким образом, окомкованию способствуют жидкости, имеющие угол смачивания поверхности материала $\Theta_0 < 25^\circ$, при этом материалы можно увлажнять практически до состояния максимальной капиллярной влагоемкости (по В.М. Витюгину).

Рассмотрим вопрос определения угла смачивания Θ для случая контакта сферической частицы и плоскости. Согласно рис. 1,6 и, используя изложенную ранее методику для данного случая, запишем

$$\omega_{ЖТ}^{(2)} = 2\pi \int_0^{AP} (r_1 + r_2' - \sqrt{b}) \sqrt{1 + \frac{(y - r_2' \cos \Theta)^2}{b}} dy,$$

где

$$b = r_2'^2 \sin^2 \Theta + 2r_2' y \cos \Theta - y^2,$$

$$AP = r_2' (\sin \psi + \cos \Theta)$$

После преобразований получили:

$$d\omega_{ТЖ}^{(2)} = 4\pi \left[\left(\frac{r_1}{2} + r_2' \right) \psi - r_2' (\sin \psi + \cos \Theta) \right] dr_2'. \quad (8)$$

Производная от $\omega_{ТЖ}^{(2)}$ по r_2' имеет вид

$$d\omega_{ТЖ}^{(2)} = 2\pi \left\{ R \left[\sin \psi + \cos \Theta + \cos(\Theta + \psi)(1 - \sin \Theta) + \frac{r_2'(1 - \sin \Theta)^2}{R} \right] \right\} dr_2'. \quad (9)$$

Используя подстановку (8) и (9) в (2), получим

$$\frac{\sigma_{ТГ} - \sigma_{ТЖ}}{\sigma_{ЖГ}} = \frac{2 \cdot \left[\frac{r_1}{2} \psi + r_2'(\psi - \sin \psi - \cos \Theta) \right]}{R \left[\sin \psi + \cos \Theta + \cos(\Theta + \psi)(1 - \sin \Theta)^2 + r_2'(1 - \sin \Theta)^2 \right]} \quad (10)$$

Зная величины $\sigma_{ТГ}, \sigma_{ТЖ}, \sigma_{ЖГ}$ с учетом количества жидкости в области взаимодействия, из (10) определяется краевой угол Θ для твердых частиц, имеющих сферическую форму согласно рис. 1,б и рис. 1,а.

Используя приведенную методику, легко можно найти угол для случая двух сфер разных размеров.

Вывод: Таким образом, получена математическая модель, связывающая равновесный краевой угол смачивания с геометрией контактирующих сферических частиц и наличием жидкостной прослойки между ними, а также произведен анализ модели на предмет соответствия ее физическим представлениям о капиллярном взаимодействии различных по характеру кривизны поверхностей. При $\Theta < 20^\circ$ изменение размеров частиц слабо влияет на изменение Θ .

In the article influence of curvature of bodies on a wetting angle of watering Θ is investigated. The system a solid body-liquid-gas is considered. Versions of cohesion both similar particles, and particles with a plane are considered. The mathematical model connecting an equilibrium boundary angle of wetting with geometry of contacting spherical particles and presence of a liquid interlayer between them is obtained, and also the analysis of model is produced for correspondence to its physical representations about capillary interaction various on character of curvature of surfaces

1. Вегман Е.Ф. Окускование руд и концентратов. Изд. Металлургия 1984.
2. Современная теория капиллярности. Под ред. А.И. Русанова, Ф.И. Гидрича. - Л.: Химия, 1980, - 245с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ
НА УПРАВЛЕНИЕ В ПАКЕТЕ MATLAB

Ковриго Ю.М., Фоменко Б.В., Полищук И.А.

При разработке систем автоматического регулирования актуальной задачей является использование таких алгоритмов управления, которые включали бы какую-либо функцию, ограничивающую выходной сигнал. Выходной сигнал регулятора должен иметь ограниченную амплитуду по крайней мере по двум причинам: во-первых, амплитуда выходного сигнала не может превышать диапазон цифро-аналогового преобразователя на выходе компьютера; во-вторых, рабочий диапазон исполнительного механизма всегда ограничен, клапан нельзя открыть больше, чем на 100%, на двигатель нельзя подавать неограниченный ток и напряжение. Таким образом, существуют нелинейности, которые все же следует учитывать явно. В системах управления производственными процессами часто используются регулирующие клапаны, которые представляют собой нелинейности типа насыщения, когда верхняя и нижняя границы соответствуют полностью открытому или полностью закрытому положениям (рис. 1).

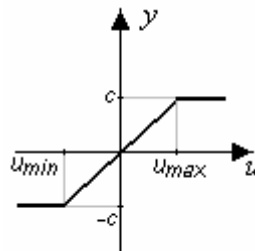


Рис. 1 Статическая характеристика нелинейного элемента типа насыщение

Уравнение нелинейного элемента типа насыщение представлено формулой (1):

$$\bar{u} = \begin{cases} u_{\min}, & \text{при } u < u_{\min} \\ u, & \text{при } u_{\min} \leq u \leq u_{\max} \\ u_{\max}, & \text{при } u > u_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

Интегральное насыщение представляет собой эффект, который наблюдается, когда ПИ- или ПИД-регулятор в течение длительного времени должен компенсировать ошибку, лежащую за пределами диапазона управляемой переменной, поскольку выход регулятора ограничен, ошибку сложно свести к нулю.

Если ошибка управления длительное время сохраняет знак, величина интегральной составляющей регулятора становится очень большой. Это, в частности, происходит, если управляющий сигнал ограничен настолько, что расчетный выход регулятора отличается от реального выхода исполнительного механизма. Так как интегральная часть становится равной нулю лишь некоторое время спустя после того, как значение ошибки изменило знак, интегральное насыщение может привести к большому перерегулированию [1].

Величина интегральной составляющей ПИ-регулятора пропорциональна площади, ограниченной переходной характеристикой y и заданным значением y^* . Если ошибка $e = y^*(t) - y(t)$ положительна, интегральный член будет возрастать; в противном случае он уменьшается. Пока управляющий сигнал неограничен, насыщение отсутствует. Если управляющий сигнал ограничен, реакция становится более медленной и интегральная часть увеличивается до тех пор, пока ошибка не изменит знак при $t = t_1$. Однако даже по-

сле изменения знака ошибки управляющий сигнал u остается большим и положительным в течении длительного времени, что приводит к значительному перерегулированию по $y(t)$.

Следовательно, для улучшения качества функционирования системы автоматического регулирования необходимо учитывать наличие ограничений, связанных с нелинейностями в системе. Задачу синтеза системы с ограничениями в виде неравенств на управляющее воздействие можно решить тремя методами:

- принцип максимума;
- динамическое программирование;
- инженерные методики.

Принцип максимума ориентирован на определение программного оптимального управления. Задача оптимального управления сводится к отысканию таких управлений, удовлетворяющих наложенным ограничениям, которые одновременно с переводом объекта (системы) из одного положения в другое обеспечивают экстремум выбранного функционала качества. Принцип максимума – необходимое и достаточное условие оптимальности только для линейных объектов. Для общего случая нелинейных объектов он является только необходимым. Это означает, что с его помощью находится не оптимальное управление, а некоторая суженная группа допустимых управлений, только среди которых может быть искомое оптимальное управление, если оно вообще существует. Нахождение последнего должно производиться далее, например, перебором.

Динамическое программирование, наряду с принципом максимума, является основным математическим методом, с помощью которого определяется оптимальное управление. В отличие от принципа максимума, который формулируется таким образом, что оказывается ориентированным, прежде всего, на определение оптимального управления в виде оптимальной программы, динамическое программирование позволяет определить оптимальное управление только в форме синтезирующей функции. Решение задач синтеза оптимальных систем с помощью динамического программирования численными методами требует такого объема вычислительной работы, которая в настоящее время посильна только современным вычислительным комплексам с большим объемом оперативной памяти (типа RS-6000/42T) [2].

Основное внимание в данной статье уделяется инженерным методикам. При обзоре существующих инженерных методик было выделено 3 подтипа:

- I. Методика по расчету настроек регулятора;
- II. Методика условного интегрирования;
- III. Методика с компенсацией интегрального насыщения.

I. Экспресс-метод расчета настроек ПИ-регулятора позволяет непосредственно определять настройку системы с учетом требуемого ограничения на максимальную величину регулирующего воздействия. В основу этого метода положены формулы для расчета параметров динамической настройки ПИ-регулятора для отработки задающего сигнала путем полной компенсации большей постоянной времени. Так как максимальная величина перемещения регулирующего органа пропорциональна коэффициенту усиления регулятора, то для ограничения величины максимального регулирующего воздействия при отработке АСР задающих воздействий необходимо уменьшить коэффициент усиления регулятора. Для определения параметров настройки пропорциональной составляющей регулятора используются номограммы [3].

II. Суть методики условного интегрирования состоит в следующем: пока ошибка e достаточно велика, ее интегральная часть не требуется для формирования управляющего сигнала, а для управления достаточно пропорциональной части. Интегральная часть, используемая для устранения стационарных ошибок, необходима только в тех случаях, когда ошибка невелика. При условном интегрировании эта составляющая учитывается в окончательном сигнале, только если ошибка не превосходит определенного порогового

значения. При больших ошибках ПИ-регулятор работает как пропорциональный регулятор. Выбор порогового значения для активизации интегрального члена – далеко не тривиальная задача. В аналоговых регуляторах условное регулирование можно выполнить с помощью диода Зенера (ограничителя), который подключается параллельно с конденсатором в цепи обратной связи операционного усилителя в интегрирующем блоке регулятора. Такая схема ограничивает вклад интегрального сигнала [1].

III. Методика разработки систем автоматического управления с компенсацией интегрального насыщения состоит в выполнении двухшаговой процедуры:

- 1). Разработать систему автоматического регулирования, предполагая, что линеаризованная модель адекватно отображает динамику реальной замкнутой системы;
- 2). Дополнительная нелинейная обратная связь разрабатывается с целью улучшения реакции до тех пор, пока не будут выполнены требования к системе.

Для более подробного рассмотрения существующих алгоритмов компенсации интегрального насыщения были составлены модели в среде визуального программирования Simulink пакета MatLab:

Алгоритм 1. В регуляторе используется интегратор с фиксатором выходного сигнала. Эта схема просто включает в себя фиксацию выходного сигнала интегратора на определенном максимальном уровне (рис.2).

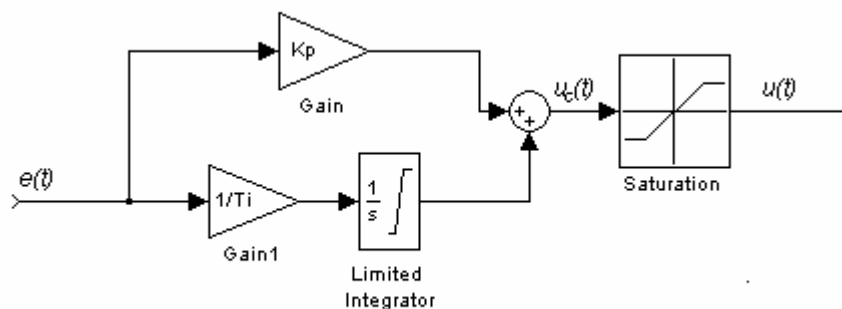


Рис. 2 Модель, составленная в среде Simulink, для 1 алгоритма

Алгоритм 2. Отключение интегратора при насыщении. Эта схема включает в себя отключение входа интегратора при насыщении исполнительного механизма (рис. 3).

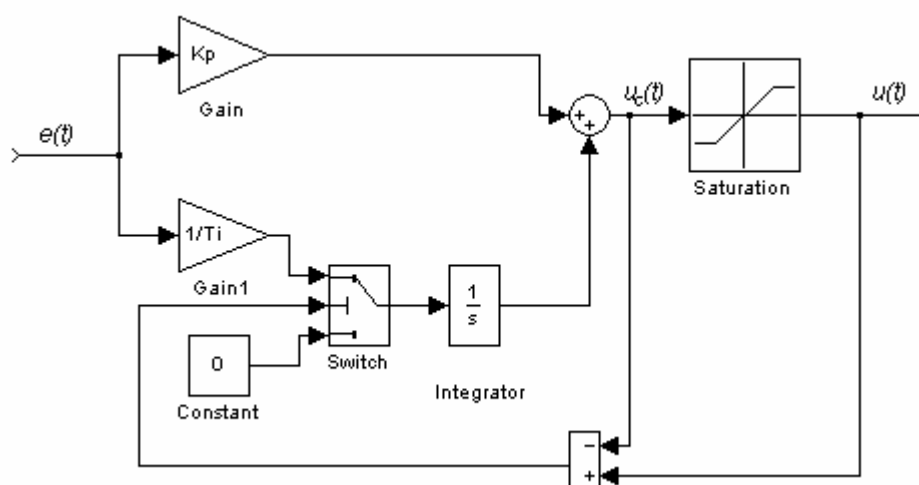


Рис. 3 Модель, составленная в среде Simulink, для 2 алгоритма

Алгоритм 3. Нелинейная коррекция. Регулятор состоит из обычного интегратора в прямой цепи и нелинейности типа зоны нечувствительности в цепи обратной связи интегратора (рис. 4) [4].

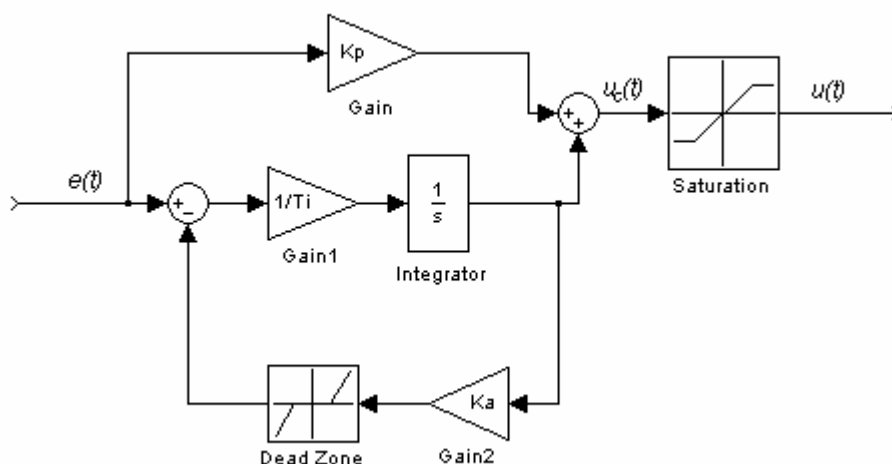


Рис. 4 Модель, составленная в среде Simulink, для 3 алгоритма

Алгоритм 4. Обратная связь по насыщению. Эта схема включает дополнительную обратную связь, которая уменьшает вход интегратора пропорционально ошибке насыщения e_s (рис. 5). На вход интегратора подается сигнал e_a , который вычисляется по формуле (2):

$$e_a = (-u_c + u) \cdot K_a = e_s \cdot K_a \quad (2)$$

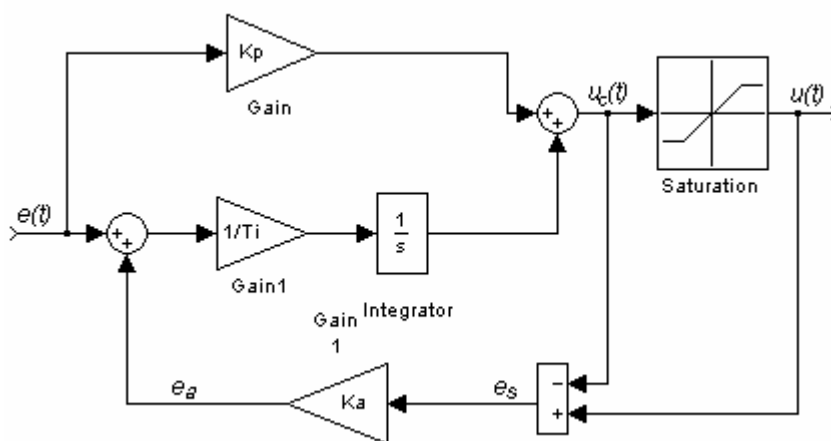


Рис. 5 Модель, составленная в среде Simulink, для 4 алгоритма

Алгоритм 5. Обратная связь по насыщению. На вход интегратора подается сигнал e_a (рис. 6), который вычисляется по формуле (3):

$$e_a = (-u_c + u) \cdot \frac{K_a}{T_a \cdot s + 1} = e_s \cdot \frac{K_a}{T_a \cdot s + 1} \quad (3)$$

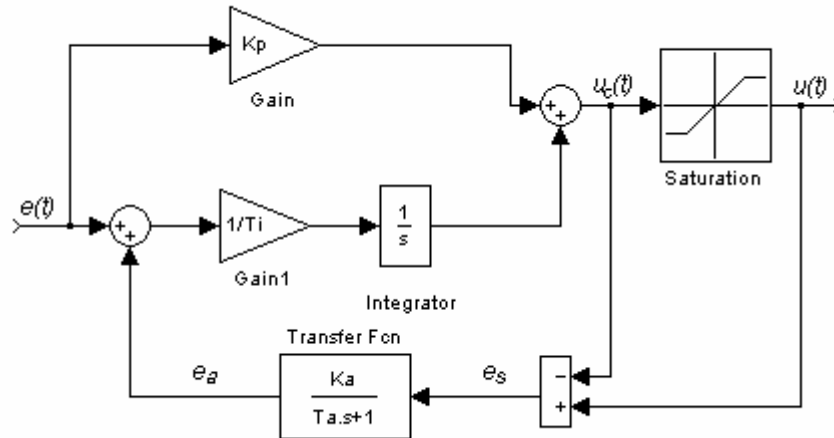


Рис. 6 Модель, составленная в среде Simulink, для 5 алгоритма

Пример:

Рассмотрим работу 3, 4 и 5 алгоритмов компенсации интегрального насыщения на примере системы автоматического регулирования температурой первичного пара парогенератора ТП-100 блока 200 МВт. Температура перегрева пара на выходе парового котла относится к важнейшим параметрам, определяющим надежность и экономичность работы паровой турбины и энергоблока в целом, поэтому предъявляются высокие требования к качеству регулирования этого параметра.

1) Рассчитаем оптимальные настройки ПИ-регулятора для линейной системы автоматического регулирования. Для определения оптимальных параметров используем стандартный пакет NCD Blockset, предназначенный для настройки параметров модели методом численной оптимизации по переходному процессу [5].

В среде Simulink смоделируем систему автоматического регулирования, которая представлена на рисунке 7.

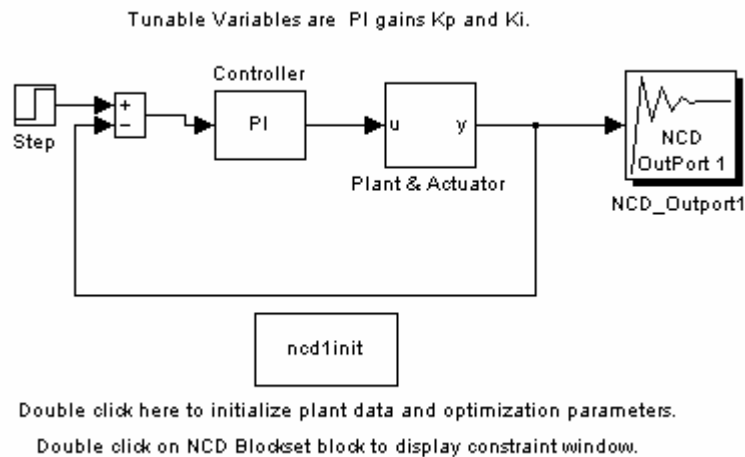


Рис. 7 Система автоматического регулирования в среде Simulink

В блоке NCD установим ломаными линиями область, из которой не должен выходить переходный процесс (рис. 8).

К переходному процессу по каналу задание-выход предъявлялись следующие требования:

- Максимальное перерегулирование – не более 20 %;
- Время нарастания – не более 350 с.;
- Длительность переходного процесса – не более 600 с.

Перед моделированием задаем начальные значения параметров регулятора, в меню Optimization указываем переменные, которые необходимо оптимизировать. Переходный процесс до и после оптимизации представлен на рис. 8.

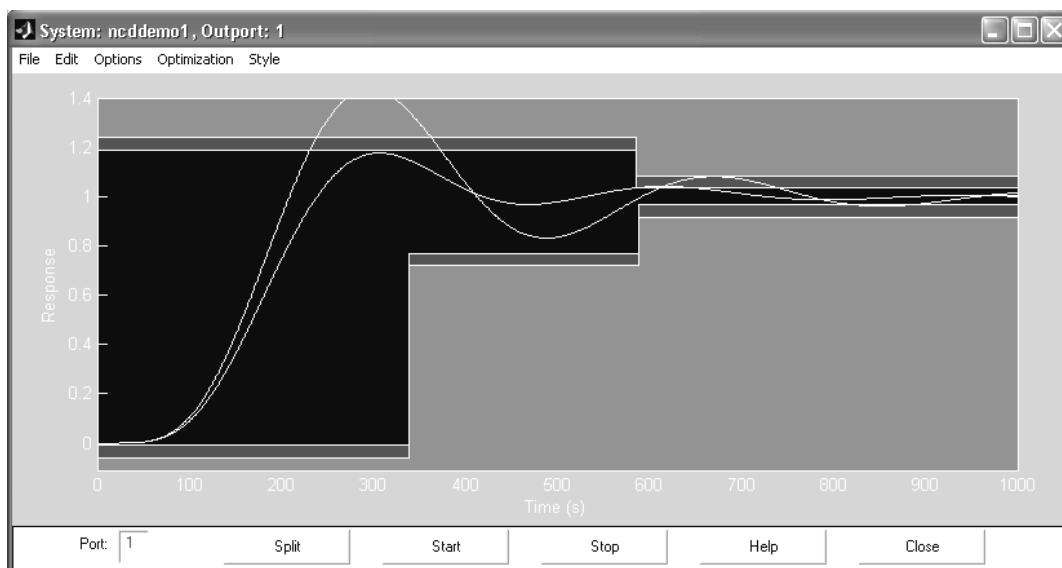


Рис. 8 Переходный процесс до и после оптимизации

2) Далее введем ограничения на управляющую величину и дополним систему алгоритмом компенсации интегрального насыщения. Для определения численных значений параметров K_a из 3, 4 алгоритмов и K_a, T_a из 5 алгоритма воспользуемся пакетом NCD Blockset, в котором для решения этой задачи используются процедуры нелинейной оптимизации с ограничениями из пакета Optimization Toolbox. После нахождения искомым настроек в среде Simulink была смоделирована система автоматического регулирования температуры перегретого пара с ограничениями на управляющую величину, также было проведено сравнение работы алгоритмов компенсации интегрального насыщения на примере рассматриваемой АСР. Результаты математического моделирования представлены на рисунках 9 и 10, и сведены в таблицу 1.

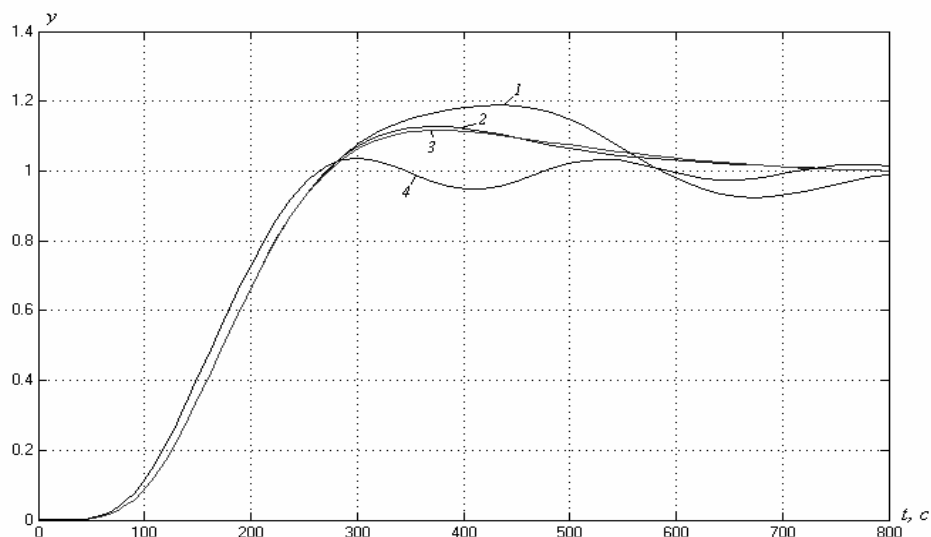


Рис. 9 Переходный процесс по каналу задание-выход

1 – АСР без механизма компенсации интегрального насыщения; 2 – АСР с механизмом компенсации интегрального насыщения по 4 алгоритму; 3 - АСР с механизмом компенсации интегрального насыщения по 5 алгоритму; 4 - АСР с механизмом компенсации интегрального насыщения по 3 алгоритму.

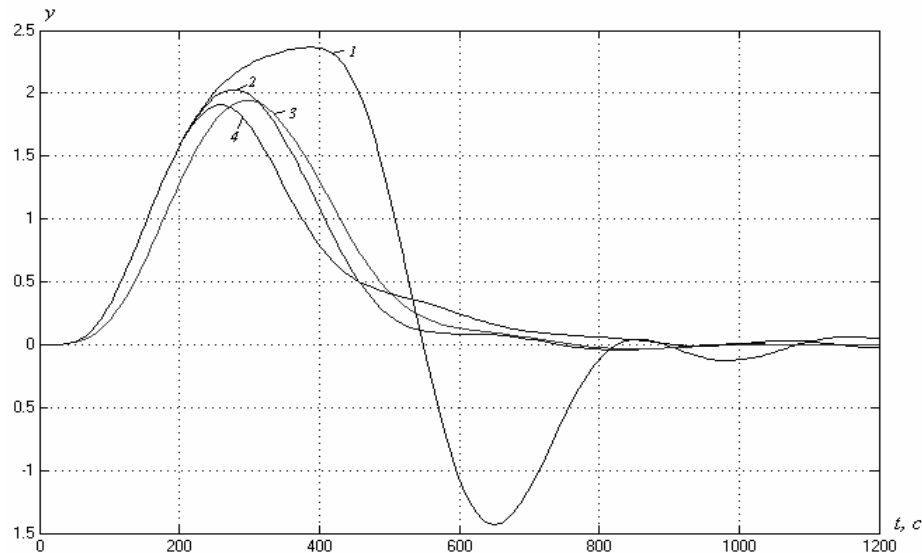


Рис. 10 Переходный процесс по каналу возмущение-выход
 1 – АСР без механизма компенсации интегрального насыщения; 2 – АСР с механизмом компенсации интегрального насыщения по 4 алгоритму; 3 - АСР с механизмом компенсации интегрального насыщения по 5 алгоритму; 4 - АСР с механизмом компенсации интегрального насыщения по 3 алгоритму.

Таблица 1

Показатели качества

Вид АСР	По каналу возмущение -выход		По каналу задание-выход	
	$\Delta_{дин}$	$T_{рег}, с.$	Π	$T_{рег}, с.$
1. АСР без механизма компенсации интегрального насыщения	2,35	1025	19	725
2. АСР с механизмом компенсации интегрального насыщения по 4 алгоритму	2	560	13	530
3. АСР с механизмом компенсации интегрального насыщения по 5 алгоритму	1,9	640	11	530
4. АСР с механизмом компенсации интегрального насыщения по 3 алгоритму	1,88	700	-	300

Из проведенных исследований и анализа полученных переходных процессов можно сделать следующие выводы:

- если регулятор не учитывает насыщение исполнительного механизма, то при достижении управляющего воздействия ограничений, увеличивается время регулирования $T_{рег}$, динамическая ошибка $\Delta_{дин}$ и перерегулирование Π .

- если в систему автоматического регулирования ввести алгоритм учета ограничений, то значительно повышается качество регулирования: по каналу задание-выход – уменьшилось время регулирования в 1,37 с использованием 4 и 5 алгоритмов, в 2,42 для 3 алгоритма; уменьшилось перерегулирование в 1,46 для 4 алгоритма, в 1,72 для 5 алгоритма, для 3 алгоритма перерегулирование отсутствует; по каналу возмущение-выход – уменьшилось время регулирования в 1,8, 1,6 и 1,46 с использованием 4, 5 и 3 алгоритмов соответственно; уменьшилась динамическая ошибка в 1,18, 1,24 и 1,3 с использованием 4, 5 и 3 алгоритмов соответственно.

Использование алгоритмов компенсации интегрального насыщения имеют следующие достоинства: реализация метода не требует мощных вычислительных средств и значительно улучшается качество регулирования.

При разработке систем автоматического регулирования следует учитывать наличие некоторых нелинейностей и использовать алгоритмы учета ограничений в зависимости от доступных технических средств автоматизации, сложности процесса и технологических требований к нему. Перспективным является использования методов компенсации интегрального насыщения в самонастраивающихся системах автоматического управления с использованием алгоритмов адаптации и идентификации [6].

This article deals with the problem of designing controllers to systems with input constraints, focus is put on anti-windup method. The application of anti-windup design has shown.

1. Густав Олсон, Джангуидо Пиани. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский диалект, 2001. – 557 с.;
2. Попов П.М., Ляшко Ф.Е. Оптимальное управление в ходе эволюционного развития процессов и систем: Учебное пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2000. – 148 с.;
3. Кулаков Г.Т. Инженерные экспресс-методы расчета промышленных систем регулирования: Спр. пособие. – Мн.: Выш. шк., 1984. – 192 с.;
4. Richard C. Dorf, Robert H Bishop. Modern control Systems (10th Edition): Prentice Hall, 2004. – 830 p.;
5. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. Серия «Библиотека профессионала». – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.;
6. Ковриго Ю.М., Фоменко Б.В., Поліщук І.А. Адаптивна система регулювання витрати палива// Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы. - 2007. - №1(19). – С.136-140.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МНОГО РЕЖИМНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ
ДИНАМИКИ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА БАРАБАННОГО КОТЛА
СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Ложечников В.Ф., Михайленко В.С., Максименко И.Н.

Повышение экономичности работы теплоэнергетического оборудования за счет повышения технического уровня систем автоматического управления возможно по двум основным направлениям: использование современного комплекса технических средств (компьютеризированные управляющие комплексы с надежными, высокоточными, мало инерционными датчиками технологических параметров) и усовершенствование структурных схем систем автоматического регулирования (как правило, за счет введения в контур контроля дополнительных информационных сигналов об изменении технологических параметров или использование более сложного алгоритма управления [1]).

Большой интерес представляют технические решения, которые без привлечения значительных средств позволяют снизить потребление топлива и уменьшить выбросы вредных веществ в окружающую среду. Исследования, проведенные в США в 1990-1997 годах, показали, что повышение точности регулирования соотношения топливо-воздух позволяет повысить эффективность энергосбережения на 2 - 20%.

На энергетических и промышленных предприятиях Украины в настоящее время идет процесс замены аналоговых систем управления на цифровые. Однако, возможности, которые предоставляют современные технические средства автоматизации, используются не полностью. В частности, на новой технике реализуются типовые схемы и алгоритмы управления, которые были разработаны более 30 лет назад с учетом ограниченных возможностей аналоговых систем управления.

Современный подход к концепции автоматического управления связан с рассмотрением объекта управления в виде сложной динамической системы с определенным числом входов и выходов. Расчет управляющего воздействия происходит с учетом прямых и перекрестных связей между управляющими воздействиями и регулируемым параметрами. Рассчитанное управляющее воздействие должно обеспечить минимум заданному критерию качества вида

$$J = \int_0^{\infty} (x^T \cdot Q \cdot x + u^T \cdot R \cdot u) \cdot dt \quad (1)$$

где x – вектор внутреннего состояния объекта управления; u – вектор управляющего воздействия, Q и R – весовые матрицы.

Для решения задачи оптимального управления в соответствии с заданным критерием качества необходима математическая модель, которая адекватно описывает поведение объекта управления во всем диапазоне изменения нагрузок.

Анализ разработанной математической модели динамики барабанного котла [2] показал, что наряду с медленно изменяющимися регулируемым параметрами (давление пара в паропроводе, солесодержание котловой воды) в объекте управления присутствуют мало инерционные каналы по разрежению дымовых газов в топочной камере и концентрации кислорода в уходящих газах. При большой размерности математической модели и большом численном различии собственных значений матрицы A , которое обусловлено сильным различием скорости протекания переходных процессов в барабанном котле, возникают вычислительные трудности при нахождении матрицы регулятора системы K . Кроме того, при включении многомерной системы регулирования все выходы системы должны быть одновременно замкнуты с ее входами, и, в случае отказа одного из каналов управления или измерения, а также, переводе части контролируемых параметров на ручное управление, переходные процессы регулирования в системе могут стать неустойчивым.

Газо-воздушный тракт барабанного котла состоит из газохода и воздуховода. Регулируемыми параметрами для этого участка являются: разрежение дымовых газов в верхней части топочной камеры и избыток воздуха, характеризующий экономичность процесса горения.

При выводе дифференциальных уравнений газохода и воздуховода, как участков регулирования разрежения в топке, были приняты следующие допущения: газоход после дымососа и воздуховод после дутьевого вентилятора очень короткий и что обратная реакция давления в топке на расход мазута и воздуха на входе пренебрежимо мала; аккумулирующая емкость топки и газоходов сосредоточена в одном объеме, а дроселирующая способность газоходов и поверхностей нагрева сосредоточена в одной точке. Регулирование осуществляется путем изменения положения направляющего аппарата дымососа и дутьевого вентилятора. С учетом перечисленных допущений регулируемые участки могут быть заменены упрощенной системой, состоящей из емкости, дросселя и дымососа (дутьевого вентилятора).

Регулируемой величиной является отклонение давления в топке ΔP_p от заданного значения; входной величиной (регулирующим воздействием) – изменение положения направляющего аппарата дымососа $\Delta \varphi_r$. В качестве внешнего возмущения примем изменение расхода уходящих газов на притоке ΔM . Таким образом, дифференциальное уравнение участка имеет вид:

$$T_2 \Delta \ddot{P}_p + T_1 \Delta \dot{P}_p + \Delta P_p = k_4 \Delta \dot{\varphi}_r + k_3 \Delta \varphi_r + k_2 \Delta \dot{M} + k_1 \Delta M. \quad (2)$$

Динамические свойства воздуховода, определяющие зависимость между изменением подачи воздуха в топку котла и положением направляющего аппарата дутьевого вентилятора $\Delta \varphi_B$, описываются уравнением вида:

$$T_4 \Delta \ddot{M}_L + T_3 \Delta \dot{M}_L + \Delta M_L = k_6 \Delta \dot{\varphi}_B + k_5 \Delta \varphi_B. \quad (3)$$

Коэффициент избытка воздуха λ , который нельзя непосредственно измерить, может быть определен по содержанию кислорода в дымовых газах C_{O_2} практически независимо от состава топлива. Коэффициент избытка воздуха определяется расходом воздуха M_L и расходом топлива M_B . Однако на практике C_{O_2} не удается измерить в точке, расположенной непосредственно за зоной окончания процесса горения. В большинстве случаев точка отбора пробы находится в конвективной части котла. При этом газы первоначально перемешиваются в зоне горения, затем транспортируются через радиационные поверхности и затем дополнительно перемешиваются в зоне конвективных поверхностей нагрева. Глубокое перемешивание происходит в дымососе (особенно в дымососах центробежного типа). Во многих случаях эта сложная при детальном описании схема может быть аппроксимирована уравнением:

$$T_6 \Delta \ddot{C}_{O_2} + T_5 \Delta \dot{C}_{O_2} + \Delta C_{O_2} = k_8 \Delta M_L (t - \tau) + k_7 \Delta M_B (t - \tau); \quad (4)$$

где τ – время транспортного запаздывания; (принимается равным величине инерционности самого газоанализатора).

Таким образом, регулируемыми параметрами газозвоздушного тракта барабанного котла являются отклонение от номинального значения концентрации кислорода в уходящих газах ΔC_{O_2} и отклонение разрежения в топочной камере, управляющими воздействиями – изменение положения направляющих аппаратов дутьевого вентилятора $\Delta \varphi_B$ и дымососа $\Delta \varphi_r$, возмущающим воздействием – изменение расхода топлива ΔM_B (рис. 1).

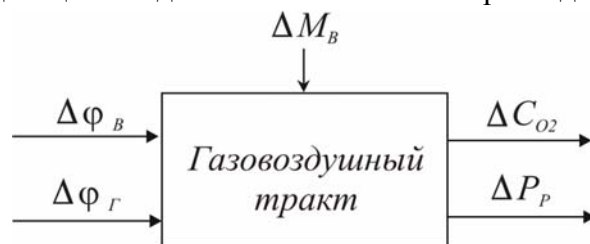


Рис. 1 Параметрическая схема газозвоздушного тракта

Численные значения коэффициентов дифференциального уравнения (2) определяются с помощью следующих соотношений:

$$T_1 = (2a_L^{\Gamma} + 2a_P^{\Gamma}) \frac{m_{\Gamma}}{\bar{P}_{\Gamma}} \alpha; T_2 = ((a_L^{\Gamma})^2 + 2a_P^{\Gamma} a_L^{\Gamma}) \left(\frac{m_{\Gamma}}{\bar{P}_{\Gamma}} \alpha \right)^2; k_3 = -b_P^{\Gamma}; k_1 = a_L^{\Gamma} + a_P^{\Gamma};$$

$$k_2 = ((a_L^{\Gamma})^2 + a_L^{\Gamma} a_P^{\Gamma}) \frac{m_{\Gamma}}{2\bar{P}_{\Gamma}} \alpha; k_4 = -a_L^{\Gamma} b_P^{\Gamma} \frac{m_{\Gamma}}{2\bar{P}_{\Gamma}} \alpha,$$

где m_{Γ} – масса дымовых газов в газоходе котла в стационарном режиме работы, кг; \bar{P}_{Γ} – давление дымовых газов в верхней части топочной камеры, Па; α – коэффициент (для газа ~ 0.85), $a_L^{\Gamma} = \frac{\Delta H_M}{\Delta Q}$, $b_P^{\Gamma} = \frac{\Delta H_{\Phi}}{\Delta \varphi}$, $a_P^{\Gamma} = \frac{\Delta H^F}{\Delta Q^F}$ – определяются графически по расходным характеристикам воздуховода и вентилятора (рис. 2).

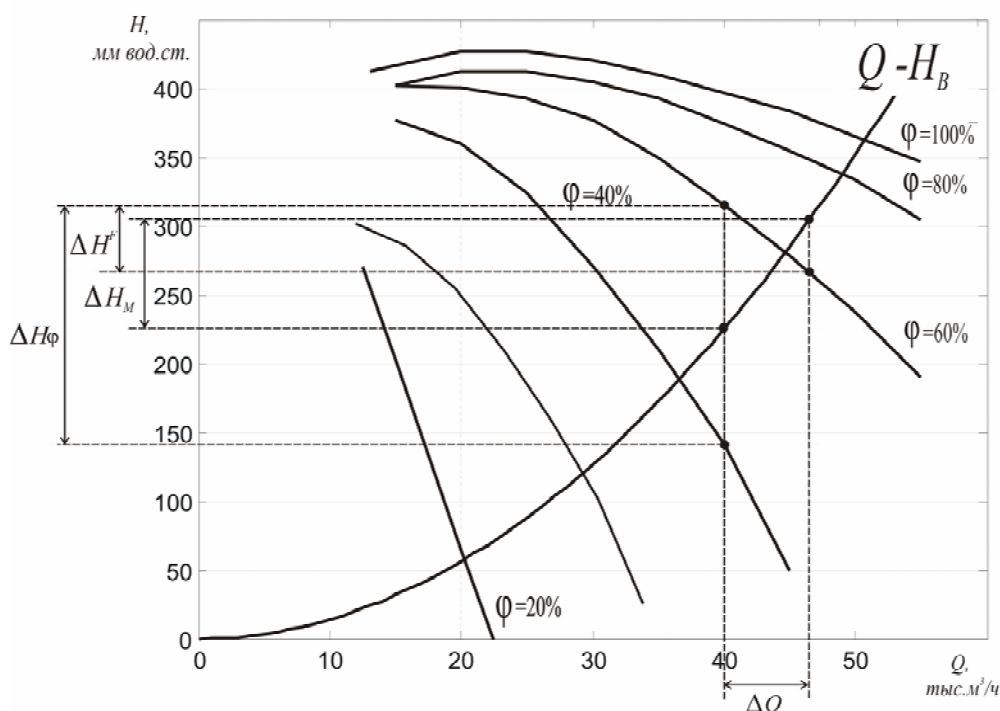


Рис. 2 Напорные характеристики вентилятора и воздуховода

Численные значения коэффициентов дифференциального уравнения (3) определяются с помощью следующих соотношений:

$$T_4 = \frac{a_P^B (a_L^B)^2}{a_L^B + a_P^B} \left(\frac{m_B}{2\bar{P}_B} \alpha \right)^2; T_3 = \frac{2a_P^B a_L^B + (a_L^B)^2}{a_L^B + a_P^B} \left(\frac{m_B}{\bar{P}_B} \alpha \right); k_6 = \frac{b_P^B a_L^B}{a_L^B + a_P^B} \left(\frac{m_B}{2\bar{P}_B} \alpha \right); k_5 = \frac{b_P^B}{a_L^B + a_P^B},$$

где m_B – масса дымовых газов в воздуховоде котла в стационарном режиме работы, кг;

\bar{P}_B – среднее значение давления воздуха в воздуховоде, Па, $a_L^B = \frac{\Delta H_M}{\Delta Q}$, $b_P^B = \frac{\Delta H_{\Phi}}{\Delta \varphi}$,

$a_P^B = \frac{\Delta H^F}{\Delta Q^F}$ – определяются графически по расходным характеристикам газохода и дымохода (рис. 3).

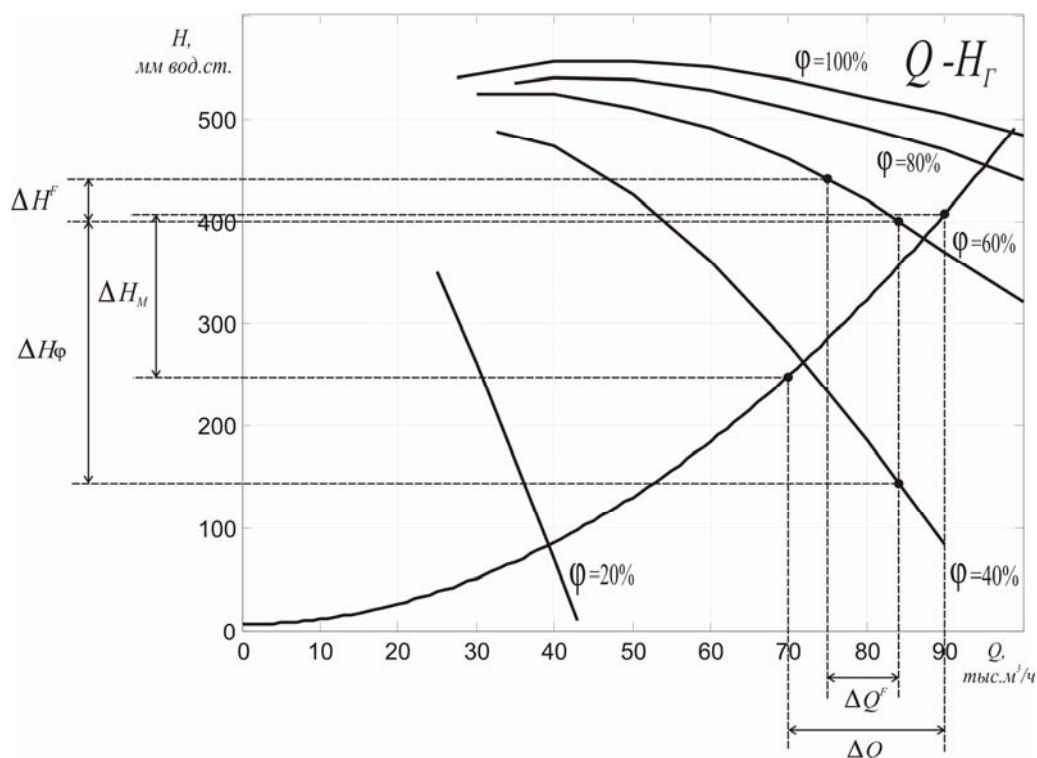


Рис. 3 Напорные характеристики дымососа и газохода

Дифференциальное уравнение, описывающее динамику изменения концентрации кислорода ΔC_{O_2} в дымовых газах, параметризуется с помощью следующих соотношений:

$$T_6 = T_B^2; T_5 = 2T_B; T_B = \frac{\bar{T}_B}{3}; k_8 = \frac{21}{M_L \bar{\lambda}}; k_7 = -\frac{21}{M_B \bar{\lambda}};$$

где \bar{M}_B , \bar{M}_L – номинальные расходы топлива и воздуха соответственно, кг/с; $\bar{\lambda}$ – коэффициент избытка воздуха; \bar{T}_B – среднее время прохода дымовых газов от топки до места замера, с.

Поскольку динамические и статические свойства барабанного котла в нестационарных режимах работы являются нелинейными, то для получения многорежимной математической модели, нелинейная модель может быть заменена спектром моделей, линеаризованных относительно нескольких типовых режимов.

Численные значения коэффициентов дифференциальных уравнений (2) ÷ (4) были определены по конструктивным и теплотехническим параметрам газо-мазутного барабанного котла ГМ-50 для трех номинальных режимов, соответствующих 50, 75 и 100% тепловой нагрузки (таблица 1).

Таким образом, многорежимная математическая модель котла, линеаризованная в окрестностях возможных режимов функционирования, может быть представлена системой матричных уравнений

$$\begin{cases} \dot{x}_i = A_i x_i + B_i u + F_i f; \\ y = C x_i; \end{cases} \quad (5)$$

где x_i – вектор внутренних состояний, соответствующих i -му режиму функционирования системы; y – вектор контролируемых параметров (выход системы), u – вектор управляющих воздействий, f – вектор основных возмущений, A_i , B_i , F_i , C – матрицы коэффициентов соответствующих размерностей. Для обеспечения высокого качества моделирования процессов во всем диапазоне изменения нагрузок, следует полагать, что матрицы A_i , B_i , F_i не являются полностью определенными, а принадлежат подмножествам

$A_i \in \bar{A}_i \pm \Delta A_i$, $B_i \in \bar{B}_i \pm \Delta B_i$, $F_i \in \bar{F}_i \pm \Delta F_i$, где $\bar{A}_i, \bar{B}_i, \bar{F}_i$ - номинальные матрицы подмножеств, а $\Delta A_i, \Delta B_i, \Delta F_i$ - матрицы отклонений, такие что $\bar{A}_{i+1} = \bar{A}_i + \Delta A_i$, $\bar{A}_{i-1} = \bar{A}_i - \Delta A_i$, $i=1..n$, где n - число рассматриваемых режимов функционирования, а матрицы $\bar{B}_{i\pm 1}, \bar{F}_{i\pm 1}$ - определяются аналогично.

Таблица 1

Численные значения коэффициентов модели динамики газовойдушного тракта котла ГМ-50

Паропроизводительность, т/ч	Коэффициент						
	$T_1,$ c	$T_2,$ c^2	$T_3,$ c	$T_4,$ c^2	$T_5,$ c	$T_6,$ c^2	$k_1,$ $\frac{Па \cdot c}{кг}$
25	1.67	0.0566	0.0748	$3.47 \cdot 10^{-4}$	16	56	1080
37.5	1.33	0.0574	0.112	$8.16 \cdot 10^{-4}$	16	56	861
50	1.04	0.0572	0.152	$7.22 \cdot 10^{-4}$	16	56	673
Паропроизводительность, т/ч	Коэффициент						
	$k_2,$ $\frac{Па \cdot c^2}{кг}$	$k_3,$ $\frac{Па}{\%}$	$k_4,$ $\frac{Па \cdot c}{\%}$	$k_5,$ $\frac{кг \cdot c}{\%}$	$k_6,$ $\frac{кг \cdot c^2}{\%}$	$k_7,$ $\frac{\% \cdot c}{кг}$	$k_8,$ $\frac{\% \cdot c}{кг}$
25	80.3	-278	-20.6	0.224	$4.55 \cdot 10^{-3}$	-39.8	2.74
37.5	87.6	-254	-25.8	0.178	$6.73 \cdot 10^{-3}$	-26.5	1.82
50	106	-125	-19.7	0.147	$6.71 \cdot 10^{-3}$	-19.9	1.37

Полученная математическая модель газовойдушного тракта котла средней мощности (параметризованная для барабанного котла ГМ-50) позволят исследовать возможности применения новых алгоритмов управления, в том числе оптимального многомерного управления. Предпосылкой для применения этого способа управления технологическим процессом является замена на энергетических и промышленных предприятиях Украины аналоговых регуляторов на микропроцессорные управляющие комплексы.

The structure of many-dimensional analytical multiplemode mathematical model and the expressions stating the coefficients of the gas-air tract of average power drum-type boiler is considered. The obtained model can be applied in constructing a modern high-quality computer control system of the boiler.

1. Кокорев С.В., Давыдов Н.И., Анисяев Е.М. Разработка, исследование и испытания системы регулирования разрежения в топке котла-утилизатора комплекса по обезвреживанию и переработке твердых бытовых и биологических отходов // Электрические станции. - 2006. - С. 38-42.

2. Ложечников В.Ф., Стопакевич А.А. Структура многомерной математической модели динамики барабанного котла средней мощности // Оптимизация управления, информационные системы и компьютерные технологии: Труды Украинской академии экономической кибернетики (Южный научный центр). - Киев-Одесса: ИСЦ, 1999. - Вып.1. - Ч.2. - С. 167-176.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЛЕВАНТНОСТИ ПРИНИМАЕМЫХ РЕШЕНИЙ С УЧЕТОМ ПСИХОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ АВТОМАТИЗИРОВАННЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

Передерий В.И., Еременко А.П.

Введение в проблему

В настоящее время в связи с ростом сложности техногенных объектов все более актуальной становится задача создания динамических человеко-машинных систем, использующих интеллектуальные методы управления и принятия решений в режиме реального времени. К числу таких систем относятся: автоматизированные производства, использующие сложные технологические процессы, энергоблоки атомных электростанций, системы транспортных средств и т.д.

Наиболее вероятной причиной выхода динамической автоматизированной системы из строя является человеческий фактор [1]. Значительное внимание уделяется обеспечению комфортной работы пользователя и оптимизации характеристик таких систем, однако практически не рассматриваются вопросы влияния взаимосвязи внешних факторов и психофункциональных характеристик пользователя на принятие релевантных решений в критических ситуациях работы системы [2-4]. С ростом сложности проектирования и эксплуатации человеко-машинных систем появляется необходимость учета данной взаимосвязи, что и обуславливает актуальность данной работы.

Цель работы

Разработка математических моделей и алгоритмов формализации взаимосвязи внешних факторов и психофункциональных характеристик пользователя для определения релевантности принимаемых решений на основе теории нечетких множеств. Создание программных средств автоматизации расчета оптимальных решений при управлении автоматизированными динамическими системами.

Изложение основного материала

Одной из основных характеристик деятельности пользователя автоматизированных систем является релевантность принимаемых им решений. Принятие нерелевантного решения является во многих случаях предпосылкой возникновения аварийной ситуации в системе.

Релевантность решений пользователя зависит от многих факторов. В соответствии с работами [1-3] можно сформулировать следующую классификацию факторов, состоящую из двух групп:

- а) факторы, связанные с окружающей средой пользователя;
- б) факторы, связанные с текущим состоянием пользователя.

К окружающей среде пользователя автоматизированной системы можно отнести следующие параметры:

а) интенсивность шума Nl (при превышении порога 120 дБ работа пользователя становится невозможной из-за резкого увеличения времени реакции и невозможности сконцентрировать внимание);

б) интенсивность вибраций Vl (при превышении амплитуды вибраций порога 0,1 мм становятся значительными утомление и напряженность зрительной системы);

в) освещенность рабочего места L (отклонение освещенности от оптимального для данного вида работ значения, в среднем 1000 лк, приводит к нарастанию напряженности и утомлению пользователя);

г) температура T (при превышении порога 33 °С у пользователя ухудшается работоспособность, увеличивается время реакций, возрастает количество ошибок, оптимальным значением температуры является 18...24 °С);

д) влажность HM (если влажность превышает уровень 30...60 %, ухудшаются такие психофункциональные характеристики человека, как время реакции, концентрация внимания и др.);

е) давление P (при отклонении от номинального 760 мм рт. ст. наблюдаются ухудшение производительности работы пользователя, увеличение времени реакции, повышение напряженности);

ж) монотонность работы MT (работа, характеризующаяся частым повторением однотипных действий, приводит к быстрому утомлению);

з) длительность работы пользователя T_w (существует оптимальное значение длительности работы, в среднем 2...3 ч, при которой производительность пользователя максимальна).

В состав группы факторов, связанных с текущим состоянием пользователя входят:

а) ограниченная информационная пропускная способность I_o ;

б) степень утомленности пользователя F ;

г) ограниченность времени принятия решения T_p ;

д) несоответствие степени напряженности TS ;

е) недостаточная мотивация M ;

ж) недостаточная концентрированность внимания A .

Особенностью факторов этой группы является то, что для каждого из них можно определить допустимые пределы изменения или оптимальное значение [2]. Отклонение этой величины от допустимых значений приводит к отрицательным последствиям, в частности, отклонение величины потока информации, поступающей к пользователю, более чем на 50% его пропускной способности, приводит к снижению производительности [3].

Для формализации взаимосвязи факторов и психофункциональных характеристик пользователя (рисунок 1, где (ч) – числовая величина, (нч) – нечисловая величина) целесообразно задать порядковые шкалы и отношения между ними [3, 5].

Пусть некоторая шкала H_i сформирована и содержит n точек. Тогда ее можно определить как объединение элементов $H_{ij}, j = 1, 2, \dots, n$:

$$H_i = H_{i1} \cup H_{i2} \cup \dots \cup H_{in} . \quad (1)$$

Пусть заданы две шкалы H_1, H_2 , относящиеся к разным величинам:

$$H_1 = H_{11} \cup H_{12} \cup \dots \cup H_{1n} , \quad (2)$$

$$H_2 = H_{21} \cup H_{22} \cup \dots \cup H_{2n} . \quad (3)$$

Для описания взаимосвязи между шкалами H_1 и H_2 целесообразно использовать бинарное отношение R , элементы которого характеризуют расстояние между соответствующими точками шкал, тогда отношение является отношением сходства:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1m} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nm} \end{bmatrix} . \quad (4)$$

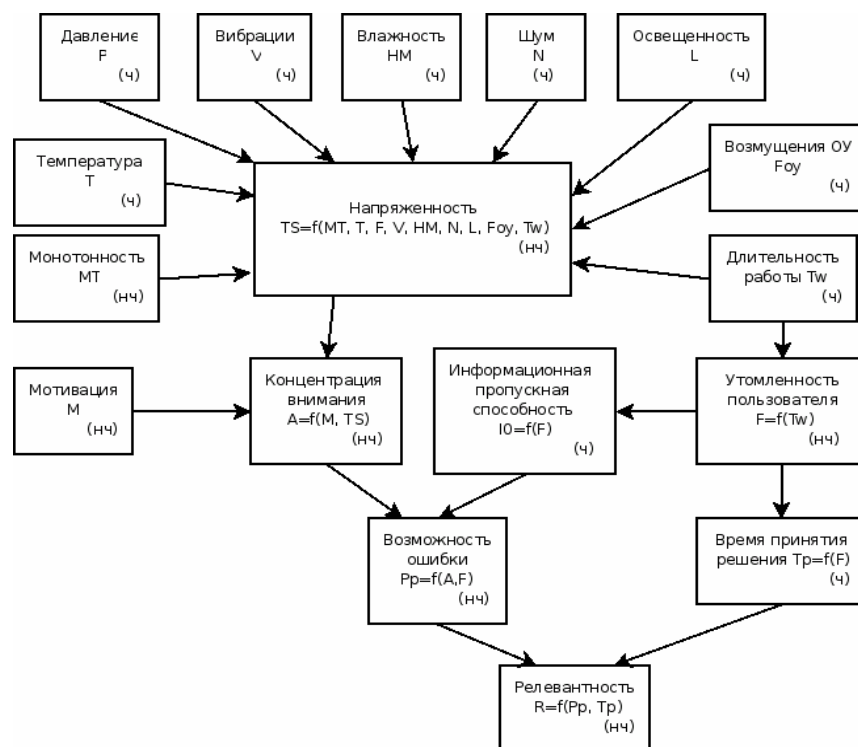


Рис. 1 Взаимосвязь внешних факторов и характеристик пользователей, определяющих релевантность принимаемых решений пользователем.

Для формализации взаимосвязи внешних факторов и психофункциональных характеристик пользователя автоматизированных систем недостаточно задавать величины R_{ij} равными 0 или 1, поскольку взаимосвязь шкал не является однозначной и строго определенной [1, 3], тогда данную задачу целесообразно решать средствами нечеткой логики, поскольку они предназначены для формализации не полностью определенных величин и качественных понятий [6-8].

Использование математического аппарата теории нечетких множеств позволяет отображать неопределенность значений параметров-шкал H_i . Если состояние некоторого параметра не может быть отнесено к одной точке его шкалы, его можно представить в виде нечеткого множества:

$$H_i = \sum_{j=1}^n \mu_j / H_{ij} \quad (5)$$

где H_{ij} - j -я точка шкалы параметра H_i , μ_j - функция принадлежности данной точки, которая показывает степень соответствия рассматриваемой ситуации j -й точке шкалы, знак суммы обозначает не арифметическую операцию сложения, а операцию объединения элементов [9].

Взаимосвязь двух нечетких множеств определяется нечетким отношением, элементы которого представляют собой значения функции принадлежности μ_{ij} для пары элементов множеств H_{1i} и H_{2j} :

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \dots & \mu_{1m} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \dots & \mu_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mu_{n1} & \mu_{n2} & \dots & \mu_{nm} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Если известны нечеткое множество H_1 и нечеткое отношение $\tilde{R} = H_1 \times H_2$, связывающее H_1 и H_2 , можно найти нечеткое множество H_2 с помощью операции max-min композиции: [7]

$$H_2 = H_1 \circ \tilde{R} = \sum_{j=1}^m \text{MAX}_{x_j \in U} \{ \mu_H(x_j) \wedge \mu_R(x_j, v_j) \} / v_j. \quad (7)$$

Если параметр H_n зависит от других параметров H_1, H_2, \dots, H_m , то в зависимости от количества параметров m можно использовать один из двух способов синтеза модели:

а) способ частных моделей, в соответствии с которым формируются частные модели:

$$H_{n1} = f_1(H_1), H_{n2} = f_2(H_2), \dots, H_{nm} = f_m(H_m), \quad (8)$$

каждая из которых описывает влияние только одного фактора, затем формируется модель агрегирования определяющая совместное воздействие факторов:

$$H_n = f(H_{n1}, H_{n2}, \dots, H_{nm}). \quad (9)$$

При синтезе каждой частной модели необходимо фиксировать на среднем уровне значения остальных параметров, не входящих в эту модель. Для отображения операции агрегирования может быть использована операция вычисления алгебраической суммы нечетких множеств $\tilde{H}_3 = \tilde{H}_1 + \tilde{H}_2$, которая определяется как $\mu_3 = \mu_1 + \mu_2 - \mu_1 \cdot \mu_2$ [10]. Способ частных моделей целесообразно применять при $m > 3$.

б) способ общей модели, в соответствии с которым формируется общая модель:

$$H_n = f(H_1, H_2, \dots, H_m), \quad (10)$$

при этом необходимо анализировать всю область определения такой функции, то есть декартово произведение $H_1 \times H_2 \times \dots \times H_m$. Общая модель представляет собой отношение (6), в котором вместо элементов $H_{21}, H_{22}, \dots, H_{2m}$ используются векторы $\{H_{11}, H_{21}, \dots, H_{m1}\}, \{H_{12}, H_{21}, \dots, H_{m1}\}, \dots, \{H_{1k}, H_{21}, \dots, H_{m1}\}, \dots$ где k - количество элементов шкалы H_1 .

Способ частных моделей требует задания меньшего количества точек области определения, однако он характеризуется значительными погрешностями при сильной взаимосвязи между аргументами функции (10). При синтезе частных моделей необходимо правильно выбрать уровни, на которых фиксируются остальные аргументы функции H_n . Способ общей модели целесообразно применять в случае невозможности разделения влияния аргументов H_1, H_2, \dots на величину H_n . При этом количество аргументов не должно превышать трех вследствие значительного увеличения количества ячеек таблицы.

Применительно к модели взаимосвязи психофункциональных характеристик пользователя автоматизированной системы способ общей модели целесообразно использовать для определения взаимосвязи возможности ошибки, времени принятия решения и релевантности принимаемого решения [3].

Поскольку воздействия окружающей среды пользователя представляют собой числовые величины, то для использования в предлагаемой модели их необходимо предварительно преобразовать в нечеткую форму (фаззифицировать). Методы фаззификации рассмотрены в [10].

Определение размерностей шкал и функций принадлежности нечетких отношений (8) целесообразно производить методом экспертных оценок [11], что позволит обобщить имеющийся у экспертов опыт и знания о влиянии рассмотренных выше факторов на работу автоматизированной системы. Методика обработки экспертных оценок должна учитывать специфику применения нечетких лингвистических переменных, определенных на счетном множестве [3, 7].

Построение формальной модели.

Предположим, что для всех нечисловых величин построены порядковые шкалы, а соответствующие нечеткие значения величин выделим знаком «тильда». Наличие связи между двумя нечисловыми переменными \tilde{N}_1 и \tilde{N}_2 обозначим с помощью нечеткого отношения $N(\tilde{N}_1 \times \tilde{N}_2)$ [9]. В качестве операции агрегирования используем алгебраическое суммирование. Система отношений, определяющих взаимодействие между факторами, с учетом обозначений рисунка 1, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 & N_{TSP}(\tilde{T}S \times \tilde{P}), N_{TSV}(\tilde{T}S \times \tilde{V}), N_{TSHM}(\tilde{T}S \times \tilde{H}M), N_{TSN}(\tilde{T}S \times \tilde{N}), N_{TSL}(\tilde{T}S \times \tilde{L}), \\
 & N_{TST}(\tilde{T}S \times \tilde{T}), N_{TSMT}(\tilde{T}S \times \tilde{M}T), N_{TSF}(\tilde{T}S \times \tilde{F}), N_{TSTW}(\tilde{T}S \times \tilde{T}W), N_{FTW}(\tilde{F} \times \tilde{T}W), \\
 & N_{FTS}(\tilde{F} \times \tilde{T}S), N_{ATS}(\tilde{A} \times \tilde{T}S), N_{AM}(\tilde{A} \times \tilde{M}), N_{IOF}(\tilde{I}O \times \tilde{F}), N_{PA}(\tilde{P}P \times \tilde{A}), \\
 & N_{PIO}(\tilde{P}P \times \tilde{I}O), N_{TF}(\tilde{T}P \times \tilde{F}), N_{RP}(\tilde{R} \times \tilde{P}P), N_{RT}(\tilde{R} \times \tilde{T}P).
 \end{aligned} \tag{11}$$

Тогда, взаимосвязь между факторами, выразим через следующую систему уравнений:

$$\tilde{R} = N_{RT} \circ \tilde{T}_p + N_{RP} \circ \tilde{P}_p \tag{12}$$

$$\tilde{P}_p = N_{PIO} \circ \tilde{I}_0 + N_{PF} \circ \tilde{F} + N_{PA} \circ \tilde{A} \tag{13}$$

$$\tilde{T}_p = N_{TF} \circ \tilde{F} \tag{14}$$

$$\tilde{F} = N_{FTS} \circ \tilde{T}S + N_{FTW} \circ \tilde{T}_w \tag{15}$$

$$\tilde{I}_0 = N_{IOF} \circ \tilde{F} \tag{16}$$

$$\tilde{A} = N_{ATS} \circ \tilde{T}S + N_{AM} \circ \tilde{M} \tag{17}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{T}S = & N_{TST} \circ \tilde{T} + N_{TSHM} \circ \tilde{H}M + N_{TSL} \circ \tilde{L} + N_{TSNL} \circ \tilde{N}L + \\
 & + N_{TSVL} \circ \tilde{V}L + N_{TSVf} \circ \tilde{V}f + N_{TSP} \circ \tilde{P} + N_{TSI} \circ \tilde{I}
 \end{aligned} \tag{18}$$

Последовательно подставляя выражения (12-18), получим:

$$\begin{aligned}
 \tilde{R} = & N_{RT} \circ (N_{TF} \circ (N_{FTS} \circ \tilde{T}S + N_{FTW} \circ \tilde{T}_w)) + \\
 & + N_{RP} \circ \{ N_{PIO} \circ (N_{IOF} \circ (N_{FTS} \circ \tilde{T}S + N_{FTW} \circ \tilde{T}_w)) + N_{PF} \circ (N_{FTS} \circ \tilde{T}S + N_{FTW} \circ \tilde{T}_w) + N_{PA} \circ (N_{ATS} \circ \tilde{T}S + N_{AM} \circ \tilde{M}) \} \\
 \tilde{T}S = & N_{TST} \circ \tilde{T} + N_{TSHM} \circ \tilde{H}M + N_{TSL} \circ \tilde{L} + N_{TSNL} \circ \tilde{N}L + N_{TSVL} \circ \tilde{V}L + N_{TSVf} \circ \tilde{V}f + N_{TSP} \circ \tilde{P} + N_{TSI} \circ \tilde{I}
 \end{aligned}$$

Данная система уравнений позволяет определить качество принимаемого пользователем решения при известных параметрах окружающей среды, а характеристики пользователя, как звена автоматизированной системы, определяются нечеткими отношениями отображающими связь между характеристиками пользователя и параметрами внешней среды:

$$\begin{aligned}
 & N_{TST}, N_{TSHM}, N_{TSL}, N_{TSNL}, N_{TSVL}, N_{TSVf}, N_{TSP}, N_{TSI}, N_{TF}, N_{FTS}, \\
 & N_{FTW}, N_{RP}, N_{PIO}, N_{IOF}, N_{FTS}, N_{PF}, N_{PA}, N_{ATS}, N_{AM},
 \end{aligned}$$

Для расчета оптимальных зависимостей внешних факторов и психофункциональных характеристик пользователя по принятию релевантных решений управления динамическими системами разработано программное обеспечение, позволяющее задавать размерности шкал (рисунок 2), элементы нечетких отношений между шкалами (рисунок 3) и рассчитывать релевантность принимаемых решений с учетом внешних факторов и психофункциональных характеристик пользователя (рисунок 4).

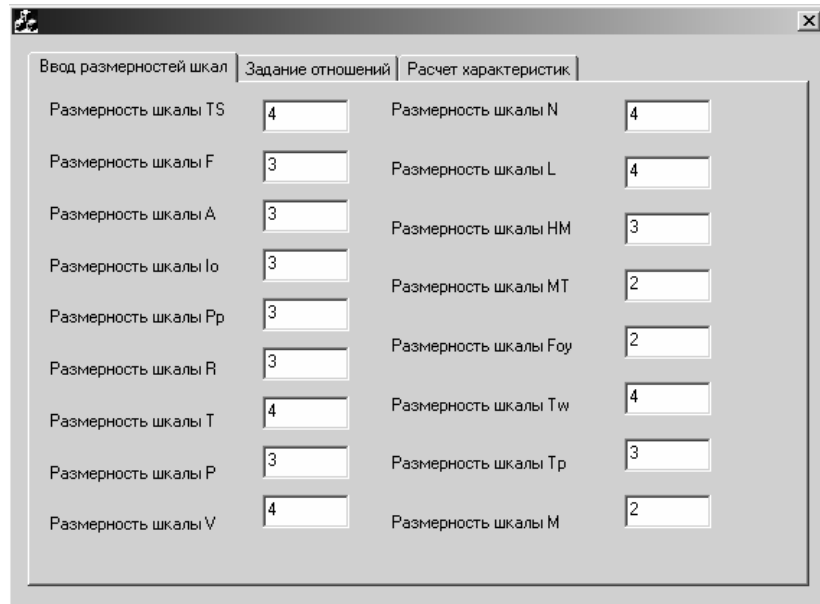


Рис. 2 Интерфейс режима настройки размерностей шкал.

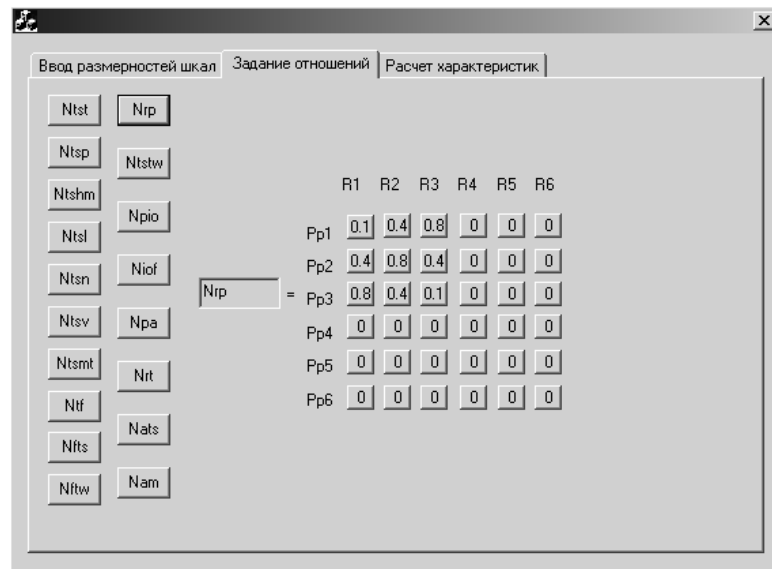


Рис. 3 Интерфейс режима задания отношений

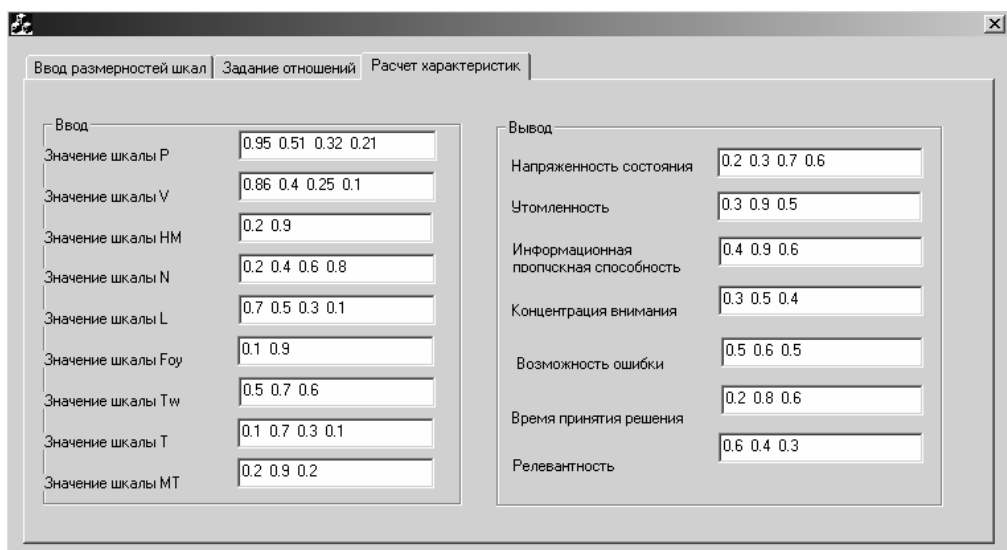


Рис. 4 Интерфейс расчета психофункциональных характеристик пользователя.

Выводы

Разработаны математические модели и алгоритмы формализации взаимосвязи внешних факторов и психофункциональных характеристик пользователя для определения релевантности принимаемых решений на основе теории нечетких множеств.

Для расчета оптимальных зависимостей внешних факторов и психофункциональных характеристик пользователя по принятию решений управления динамическими системами разработано программное обеспечение, позволяющее задавать размерности шкал внешних факторов и психофункциональных характеристик, элементы нечетких отношений между шкалами и рассчитывать релевантность принимаемых решений с учетом перечисленных факторов и характеристик.

Результаты работы могут быть использованы как в учебном процессе по изучению дисциплин принятия решений в управлении динамическими объектами, так и специалистами в области проектирования интеллектуальных систем управления.

Mathematical models and algorithms based on fuzzy sets theory for psycho functional parameters and external factors dependences for determination of users' decision relevance have been proposed. Specialized software for optimal decision determination for automatic dynamical systems control has been developed.

1. Человеческий фактор. В 6-ти тт. Т. 2 Эргономические основы проектирования производственной среды / Под ред. Г. Салвенди. - М.: Мир, 1991. - 500 с.
2. Ломов Б.Ф. Основы инженерной психологии. Учеб. пособие. Под. ред. Б.Ф. Ломова. - М.: Высшая школа, 1977. - 335 с.
3. Справочник по инженерной психологии / Под ред. Б.Ф. Ломова. - М.: Машиностроение, 1982. - 368 с.
4. Шибанов Г.П. Количественная оценка деятельности человека в системах человек-техника. - М.: Машиностроение, 1983. - 263 с.
5. Орлов А.И. Нечисловая статистика. - М.: МЗ-Пресс, 2004. - 513 с.
6. Kim B.J., Bishu R.B. Uncertainty of human error and fuzzy approach to human reliability analysis // International Journal of Uncertainty, Fuzzyness and Knowledge-Based Systems. v. 14, N. 1 2006, pp. 111-129.
7. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / Под. ред. Д.А. Поспелова. - М.: Наука, 1986. - 312 с.
8. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. - М.: Радио и связь, 1982. - 432 с.
9. Митюшкин Ю.И., Мокин Б.И., Ротштейн О.П. Soft Computing: идентификация закономерностей нечеткими базами знаний. - Винница: Универсум-Винница, 2002. - 145 с.
10. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. - СПб.: БХВ-Петербург. - 736 с.
11. Орлов А.И. Экспертные оценки. Уч. пособие. - М.: МЗ-Пресс, 2002. - 31 с.

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ ОБОБЩЕННОЙ ЗАДАЧИ БЮФФОНА

Хомченко А.Н.

Посвящается 300-летию со дня рождения Жоржа Бюффона – французского естествоиспытателя

Введение

Знаменитая задача “об игле” (G. Buffon, 1777 г.) представляет исключительный интерес не только для специалистов, развивающих и применяющих современные технологии рандомизированных вычислений. Идеи Бюффона стимулировали возникновение и развитие геометрической вероятности, заложили основы интегральной геометрии, создали теоретический фундамент метода Монте-Карло. Кроме того, геометрический подход оказался плодотворным для построения базисных функций конечно-элементной интерполяции. Появились новые задачи прикладной геометрии и новые приемы геометрического моделирования. Известный парадокс Бертрана [1], ослабивший на какое-то время доверие к геометрической вероятности, после убедительных разъяснений Бореля и Пуанкаре стал источником многочисленных обобщений. Надо отметить, что первое обобщение задачи “об игле” принадлежит самому Бюффону. К сожалению, Бюффон не нашел правильного решения обобщенной задачи. Это не удивительно. В математике нет другого такого раздела, в котором столь же легко допустить ошибку, как в теории вероятностей. Правильное решение удалось получить Лапласу [2]. Представляет интерес анализ причин возникновения “ошибочных” решений. “Ошибочными” мы называем решения, не совпадающие точно с решением Лапласа. “Ошибки” являются результатом некоторой предвзятости авторов, которая нередко допускается в математическом (в особенности, стохастическом) моделировании. Понятно, что качество решения нетрудно установить по экспериментальным оценкам знаменитой константы π .

Анализ предшествующих публикаций, постановка задачи

Задача “об игле” Бюффона была сформулирована в 1733 г., а опубликована вместе с решением только в 1777 г. [1, 2]. Появление геометрических вероятностей стало выдающимся событием в науке. Оно способствовало формированию нового языка, стиля и облика теории вероятностей [3]. Благодаря геометрическим вероятностям возникла и бурно развивается интегральная геометрия [4]. Классические результаты Бюффона лежат в основе современного и весьма универсального метода статистического моделирования [5]. В последние годы геометрические вероятности успешно применяются в конечно-элементном анализе [6, 7].

Цель статьи – проиллюстрировать простой и наглядный способ решения классической и обобщенной задачи Бюффона. Особенность предложенного подхода в том, что он обнаруживает одну из причин возникновения “ошибочных” решений обобщенной задачи Бюффона.

Основная часть.

Классическую задачу Бюффона с подробным решением можно найти практически в каждом учебнике или задачнике по теории вероятностей. Обобщенная задача встречается гораздо реже. Например, в [2] можно найти формулировку и ответ Лапласа, а в [8] – формулировку, решение и ответ, не совпадающий с ответом Лапласа. Именно с этими двумя результатами мы будем сопоставлять другие возможные модели.

Сформулируем классическую задачу Бюффона, используя обозначения [2]. Пусть плоскость разграфлена параллельными прямыми на расстоянии a друг от друга. На плоскость наугад бросается игла (отрезок) длины $2r < a$. Найти вероятность того, что игла пересечет какую-нибудь из прямых.

Выберем на рис.1 одну из множества горизонтальных прямых – контрольную горизонталь (КГ).

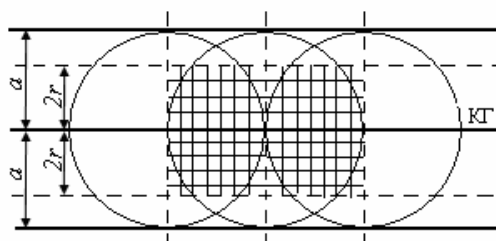


Рис.1 К выбору модели

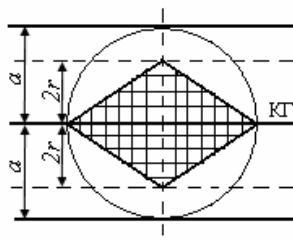


Рис. 2 К вычислению $p(A)$

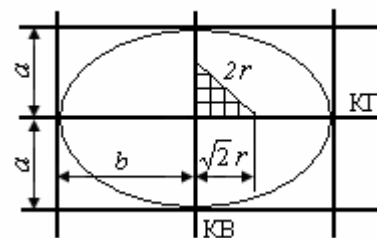


Рис. 3 К вычислению $p(AB)$

Игла бросается на плоскость наугад. Это понимается так, что все пары точек, расстояние между которыми $2r$, одинаково возможны. Мы можем (не теряя общности) ограничить пространство Ω элементарных событий кругом радиуса a с центром на КГ. Это естественно, так как по условиям симметрии опыта область Ω должна быть инвариантна относительно параллельного переноса и поворота системы параллельных прямых. Эти круги образуют бесконечную полосу шириной $2a$ (рис.1). Нас интересует событие $A = \{\text{игла пересекает КГ}\}$. Область “благоприятствования” – полоса шириной $4r$ (рис. 1). Если исключить наложение соседних кругов, получим модель для геометрического определения искомой вероятности (рис.2) по формуле

$$p(A) = \frac{S_A}{S_\Omega}, \quad (1)$$

где S_A – площадь ромба (заштрихована); S_Ω – площадь круга. Заметим, что в стандартном решении площадь S_A , как правило, вычисляется с помощью интегрирования [8]. Предложенная здесь модель в этом смысле проще. Как и следовало ожидать, она дает тот же результат:

$$p(A) = \frac{4r}{\pi a}. \quad (2)$$

Замечание. Условия симметрии опыта позволяют ограничиться лишь одной четвертью области. Именно такую конфигурацию мы используем в обобщенной задаче.

Обобщенную задачу сформулировал Бюффон, а правильное решение нашел Лаплас (1812 г.). В этом случае плоскость разграфлена двумя системами параллельных прямых: горизонталями с интервалом a и вертикалями с интервалом b . На плоскость наугад бросается игла длины $2r < a < b$. Найти вероятность того, что игла пересечет хотя бы одну из прямых.

Теперь плоскость покрыта ортогональной сеткой с прямоугольными ячейками. Понятно, что неравномерная дискретизация ($a < b$) деформирует круг Ω в эллипс. Обычно с помощью такой сетки моделируют физическую ортотропию среды, а эллиптическое диффузионное пятно можно наблюдать в лабораторных экспериментах. В центре эллипса пересекаются контрольная горизонталь (КГ) и контрольная вертикаль (КВ). Кроме события A в рассмотрение вводится случайное событие $B = \{\text{игла пересекает КВ}\}$. Поскольку A и B совместны, вычислительная формула имеет вид:

$$p(A + B) = p(A) + p(B) - p(AB). \quad (3)$$

При вычислении $p(A)$ используется прямоугольный треугольник с катетами $2r$ и b . При вычислении $p(B)$ используется треугольник с катетами $2r$ и a . А вот при вычислении $p(AB)$ применяются различные, иногда недостаточно обоснованные, гипотезы [3]. Главный вопрос: являются ли события A и B независимыми? Опубликованные решения свидетельствуют о том, что здесь единого мнения нет. По нашему мнению, лучше пользоваться геометрической вероятностью, подбирая подходящие размеры и форму области

AB. Например, на рис. 3 показана область “благоприятствования” событию *AB*. Именно при таком выборе мы получаем известное решение Лапласа [2]:

$$p(A + B) = \frac{4r(a + b) - 4r^2}{\pi ab} \quad (4)$$

Стоит обратить внимание на то, что в модели Лапласа $p(AB) \neq p(A) \cdot p(B)$, что означает зависимость случайных событий *A* и *B*. При решении этой же задачи авторы [8] опираются на независимость *A* и *B*. Возможно, поэтому их ответ

$$p(A + B) = \frac{4r\pi(a + b) - 16r^2}{\pi^2 ab} \quad (5)$$

не совпадает с ответом Лапласа. Кстати, в формуле (5) нелегко усмотреть геометрическое содержание.

Если аппроксимировать область *AB* астроидой с вершинами на контрольных прямых в точках $(\pm 2r; 0)$, $(0; \pm 2r)$, то можно получить новое решение обобщенной задачи Бюффона:

$$p(A + B) = \frac{8r(a + b) - 3\pi r^2}{2\pi ab} \quad (6)$$

Тестирование нелапласовых решений показывает, что формула (6) “ближе” к решению Лапласа. Решение с астроидой можно существенно улучшить, если вершины астроиды выбрать в точках $\left(\pm \frac{11}{6}r; 0\right)$, $\left(0; \pm \frac{11}{6}r\right)$. Незначительное сжатие астроиды дает более реалистичную область *AB*.

Фактически в решении Лапласа использована идея детерминизации математической модели путем замены случайной величины её математическим ожиданием. Это излюбленный прием статистической физики. Случайной величиной является ширина полосы, образованной иглами, пересекающими контрольную прямую. Легко заметить, что средняя ширина полосы (математическое ожидание) равна $2r$. Поэтому область “благоприятствования” для *AB* – квадрат со стороной $2r$.

Выводы

Обобщенная задача Бюффона – весьма интересный объект для компьютерных экспериментов. Эмпирические оценки числа π дают представления о качестве той или иной аппроксимации.

Three different solutions of generalized Buffon problems are analyzed.

1. Секей Г. Парадоксы в теории вероятностей и математической статистике. – М.: Мир, 1990. – 240 с.
2. Математическая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия. Т.1. А-Г. 1977. – С.571-572.
3. Кендалл М., Моран П. Геометрические вероятности. – М.: Наука, 1972. – 192 с.
4. Сантало Л. Интегральная геометрия и геометрические вероятности. – М.: Наука, 1983. – 360 с.
5. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Статистическое моделирование. – М.: Наука, 1982. – 296 с.
6. Хомченко А.Н. Метод конечных элементов: стохастический подход / Ив.-Франк. ин-т нефти и газа. – Ивано-Франковск, 1982. – 7 с. Деп. В ВИНТИ 15.10.82, №5167.
7. Хомченко А.Н. Вероятностные схемы в дискретном анализе температурных полей // Инж.-физич. журнал. – 1988. Т.55, №2. – С.323-324.
8. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Прикладные задачи теории вероятностей. – М.: Радио и связь, 1983. – 416 с.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ ПРОДУКТІВ ЗГОРАННЯ ДЛЯ ЦІЛЕЙ УПРАВЛІННЯ

Бакшанська Т.Д., Рижиков Ю.Г., Тодорцев Ю.К.

Задача управління процесом спалювання природного газу формулюється і вирішується як оптимізаційна [1]. Існуючі системи автоматичного управління горінням, що змінюють коефіцієнт надлишку повітря впливом на співвідношення "паливо – повітря" з корекцією за вмістом у димових газах кисню, недостатньо ефективні, особливо для високо-ефективних топкових пристроїв. Розповсюджені системи автоматичного регулювання процесом горіння з корекцією за вмістом кисню або продуктів недопалу, які виходять з топкових пристроїв, оптимізують процес тільки з огляду на повноту згорання, то б то вирішується лише задача мінімізації суми втрат з газами, які виходять з топкових пристроїв, і хімічною неповнотою згорання. Додаткове врахування утворення в процесі горіння токсичних продуктів згорання змушує переглянути традиційну формалізацію задачі оптимізації процесу горіння та ввести в розгляд одночасно два критерії, що враховують економічність і токсичність процесу горіння. Один зі способів згортки критеріїв приводить до адитивного узагальненого критерію оптимізації, вираженого через склад продуктів згорання.

Крім того, актуальною, на наш погляд, є задача дослідження додаткових (крім співвідношення "паливо – повітря") впливів, що можуть бути використанні для управління процесом горіння з метою зниження токсичності продуктів згорання, одним з яких є спалювання природного газу з рециркуляцією продуктів згорання. Експериментальних даних за повним складом продуктів згорання природного газу з рециркуляцією димових газів у топкових пристроях практично немає.

На основі якісного аналізу можна припустити, що такі процеси мають низку суттєвих відмін у порівнянні зі спалюванням газу у чистому повітрі. По-перше, запалення та горіння проходить у середовищі зі зніженим вмістом кисню та підвищеною кількістю баластних газів. По-друге, вміст кисню може бути змінним. По-третє, гази рециркуляції, які надходять до топки, містять токсичні компоненти, які додатково впливають на остаточну токсичність продуктів згорання.

Такий критерій у виді суми двох доданків, що враховують екологічні фактори й економічність процесу горіння, причому кожний з доданків представлено у виді безрозмірних комплексів [2], має вид:

$$I = I_{ек} + I_e \quad (1)$$

де $I_{ек} = \frac{H_2}{H_2^{доп}} + \frac{CO}{CO^{доп}} + \frac{O_2}{O_2^{доп}}$ - критерій, що характеризує економічність процесу горіння,

де H_2 , CO , O_2 - концентрація водню, оксиду вуглецю та кисню у димових газах; $H_2^{доп}$, $CO^{доп}$, $O_2^{доп}$ - допустимі значення концентрацій відповідних компонентів.

$I_e = \frac{CO}{CO^{ГПВ}} + \frac{NO}{NO^{ГПВ}}$ - критерій, що характеризує токсичність процесу горіння,

де CO , NO - поточне значення оксиду вуглецю та оксиду азоту; $CO^{ГПВ}$, $NO^{ГПВ}$ - гранично допустимі викиди відповідних компонентів.

Доцільність використання узагальненого критерію для автоматичної оптимізації процесу горіння визначається тим, що практично всі його складові залежать від співвідношення "паливо - повітря", найважливішого фактора, що визначає режим горіння та ступінь рециркуляції.

Оскільки всі складового критерію виражаються через склад продуктів згорання, то, узагальнений критерій оптимізації вимагає знання практично повного складу димових газів. У даний час із усіх компонентів газів, що виходять з топкових пристроїв, що враховуються критерієм, є можливість вимірювати лише кисень і продукти недопалу (водень і окис вуглецю).

Для дослідження процесу горіння природного газу з рециркуляцією продуктів згорання розроблена математична модель, яка побудована на методі розрахунку рівноважних продуктів реакцій, що дозволяє отримати достатньо докладний склад димових газів [3]. Математична модель є системою з трьох груп рівнянь хімічної рівноваги: рівнянь дисоціації, матеріального балансу та рівняння закону Дальтона. Для розрахунку температури горіння ці рівняння необхідно доповнити рівнянням енергетичного балансу топкового пристрою. У даній статті приведені результати розрахункових досліджень процесу горіння природного газу Шебелинського родовища у вихлопних газах топкових пристроїв наступного складу: $CH_4 = 94,1$, $C_2H_6 = 3,1$, $C_3H_8 = 0,6$, $C_4H_{10} = 0,2$, $C_3H_{12} = 0,8$, $N_2 = 1,2$.

Для опису рівноважної багатокомпонентної гетерогенної реагуючої системи потрібно задати два скінчених списки [4]:

- список d речовин, що беруть участь у реакціях - A_i , $i = \overline{1, d}$, що включають речовини q в атомарному стані, f речовин у молекулярному стані так що $q+f = d$;
- список D реакцій між d речовинами A_i , що задаються стехіометричною матрицею $\|v\|$:

$$\sum_{i=1}^d v_{ji} A_i = 0; \quad j = \overline{1, D} \quad (2)$$

Якщо в якості одного з допущень прийняти, що система являє собою суміш ідеальних газів, даному наборові реакцій відповідно до термодинамічного закону діючих мас однозначно відповідає D рівнянь дисоціації [2]:

$$\prod_{i=1}^d P_i^{v_{ij}} = K_j; \quad j = \overline{1, D}, \quad (3)$$

де P_i - парціальний тиск i -й речовини в суміші; K_j - константа рівноваги j -й реакції;

та q рівнянь закону збереження маси, записуваного для кожного σ - го елемента у складі вихідної речовини:

$$\sum_{i=1}^d a_{i\sigma} P_i = M_T (b_\sigma^T + \alpha \cdot \chi \cdot b_\sigma^o); \quad \sigma = \overline{1, q} \quad (4)$$

де $a_{i\sigma}$ - елемент атомарної матриці $\|a\|$, що показує число атомів σ -го елемента в i -й речовині; b_σ^T , b_σ^o - число молів σ -го елемента відповідно у паливі та окислювачі; χ - мольний стехіометричний коефіцієнт; M_T - число молів вихідної речовини.

Таким чином, запису рівноважного багатокомпонентного процесу у виді (2) відповідає математична модель, що складається з $D+q$ нелінійних рівнянь (3) і (4), а також рівняння закону Дальтона:

$$\sum_{i=1}^{q+f} P_i = P, \quad (5)$$

де P - тиск суміші газів.

Використання списку реакцій (2) застосовуються рекомендації і стехіометричні рівняння, приведені в роботі [1, 4, 5], яким відповідає математична модель виду (3)...(5), що дозволяє розрахувати 12 - ть найбільш ймовірних компонентів продуктів згорання: CO_2 , CO , O_2 , H_2 , H_2O , OH , NO , N_2 , C , O , H , N . З них CO , O_2 , H_2 визначають економічність процесу згорання, CO , NO - його токсичність.

Матриця стехіометричних коефіцієнтів $\|V\|$ і рівнянь дисоціації, що відповідають обраному списку реакцій, представлені у таблиці 1. Атомарна матриця $\|a\|$ - у таблиці 2.

Число молів b_{σ}^T та b_{σ}^o у випадку завдання рідкого палива ваговими частками хімічних елементів (табл. 1) розраховується при виборі умовної молекулярної маси паливної і повітряної суміші [4] за формулами:

$$b_{\sigma}^T = \sum_{i=1}^n \frac{M^{y_{cl}}}{M_{\sigma}} \cdot g_{i\sigma}^T \cdot a_{i\sigma}^T, \quad (6)$$

$$b_{\sigma}^o = \sum_{i=1}^m \frac{M^{y_{cl}}}{M_{\sigma}} \cdot g_{i\sigma}^o \cdot a_{i\sigma}^o, \quad \sigma = \overline{1, q}, \quad (7)$$

де $g_{i\sigma}^T$, $g_{i\sigma}^o$ - вагові частки σ - го елемента в i - й речовині відповідно у паливі й окислювачі; $M^{y_{cl}}$ - умовна молекулярна маса палива й окислювача; M_{σ} - атомна маса σ - го елемента; n , m - кількість речовин відповідно у паливі й окислювачі, що містять σ - й елемент; $a_{i\sigma}^T$, $a_{i\sigma}^o$ - кількість атомів σ - го елемента в i - й речовині, що входить відповідно у паливо й окислювач.

Мольний стехіометричний коефіцієнт найбільш зручно визначити за універсальною формулою [5]:

$$\chi = \frac{\sum_{\sigma=1}^k b_{\sigma}^T \cdot \chi_{\sigma}}{\sum_{\sigma=1}^k b_{\sigma}^o \cdot \chi_{\sigma}}, \quad (8)$$

де χ_{σ} - валентність σ - го елемента; k - кількість елементів, що реагують при горінні палива.

Значення констант дисоціації K_j , що входять у рівняння (3), звичайно задаються інтерполяційними формулами в залежності від температури, тому в розглянутій моделі до системи рівнянь хімічної рівноваги (3)...(8) додається рівняння енергетичного балансу топки [6], що дозволяє визначити адіабатичну температуру горіння:

$$Q_H^P + Q_b - Q_z + C_{III} \cdot r \cdot V_G \cdot t_{ep} = C_{III} \cdot V_G \cdot t_{ad} \quad (9)$$

де Q_H^P - нижча теплота згорання палива; Q_b - тепло, внесене в топку окислювачем; Q_z - втрата тепла з хімічною неповнотою згорання; C_{III} - об'ємна теплоємність продуктів згорання; V_G - обсяг димових газів; t_{ad} - адіабатична температура горіння, r - коефіцієнт рециркуляції; t_{ep} - температура газів рециркуляції.

Докладний опис складових рівняння (9) приведено в нормативному методі розрахунку котлових агрегатів [6].

Оскільки теплоємність продуктів згорання C_{III} залежить від заданої температури t_{ad} , рівняння (9) вирішується ітераційним методом.

Після розрахунку адіабатичної температури горіння, визначається максимальна температура смолоскипа за формулою [7]:

$$T_{III} = \frac{0.735}{B_{0.09}} (t_a + 273) \quad (10)$$

де B_0 - критерій Больцмана, що визначається з вираження [7]:

$$B_0 = \frac{3.62 \cdot 10^{-11}}{C_{III} \cdot d_r \cdot b} (t_a + 273)^3 \quad (11)$$

де d_r - діаметр амбразури пальника, м.

Таблиця 1

Матриця стехіометричних коефіцієнтів реакцій горіння та рівняння дисоціації

Елемент	Речовина, елемент											Відповідні реакціям горіння рівняння дисоціації	
	CO_2	CO	O_2	H_2	H_2O	C	NO	N_2	C	H	O		N
CO_2	-2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	$P_{CO}^2 \cdot P_{O_2} \cdot P_{CO_2}^{-2} - K_1 = 0$
H_2O	0	0	0	-1	-2	2	0	0	0	0	0	0	$P_{H_2} P_{H_2O}^{-2} P_{OH} - K_2 = 0$
H_2O	0	0	1	2	-2	0	0	0	0	0	0	0	$P_{H_2} P_{H_2O} P_{O_2} - K_3 = 0$
H_2	0	0	0	-1	0	0	0	0	2	0	0	0	$P_{H_2}^{-1} P_H^2 - K_4 = 0$
O_2	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	$P_{O_2}^{-1} P_O^2 - K_5 = 0$
NO	0	0	1	0	0	0	-2	1	0	0	0	0	$P_{O_2} \cdot P_{NO}^{-2} P_{N_2} - K_6 = 0$
N_2	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	2	0	$P_{N_2}^{-1} P_N^2 - K_7 = 0$
CO	0	-1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	$P_{CO}^{-1} \cdot P_C \cdot P_O - K_8 = 0$

Таблиця 2

Атомарна матриця регулюючої системи, що наведена у таблиці 1

Елемент	Речовина, елемент											
	CO_2	CO	O_2	H_2	H_2O	C	NO	N_2	C	H	O	N
C	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
H	0	0	0	2	2	1	0	0	0	1	0	0
O	2	1	2	0	1	1	1	0	0	0	1	0
N	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	1

Параметр b знаходиться з рівняння[7]:

$$b = 16 \cdot \sqrt[3]{\omega_r} \cdot \frac{273}{t_a + 273} \quad (12)$$

де ω_r - швидкість повітря в амбразурі пальника, приведена до 273 К, м/с.

$$\omega_r = \frac{G_B}{\pi \cdot d_r^2} \quad (13)$$

де G_B - витрата повітря, що визначається з виразу:

$$G_B = \frac{B_r \cdot \alpha \cdot V^0}{l} \quad (14)$$

де B_r - витрата палива, м³/с; l - число пальників.

При максимальній температурі продуктів згорання у смолоскипі розраховуються значення K_j . Рішення системи рівнянь (3)...(12) дозволяє визначити рівноважні концентрації продуктів згорання C_i .

Рішення системи рівнянь енергетичного балансу виконується методом Мюллера і дозволяє оцінити адіабатичну температуру горіння. Температура в ядрі полум'я T_{II} визначається за алгоритмом В.А. Крутієві [7].

Табличні дані залежності констант дисоціації від температури апроксимовані багатоступеневими поліномами. Коефіцієнти поліномів визначається методом найменших квадратів.

Після оцінки значень констант дисоціації здійснюється розрахунок складу продуктів згорання методом Ньютона.

За допомогою моделі, проведено розрахункове дослідження процесу горіння палива з рециркуляцією димових газів та у повітрі при однакових умовах роботи топкового пристрою.

Досліджено вплив на склад продуктів згорання співвідношення "паливо - окислювач", при різних коефіцієнтах витрати окиснення. Результати приведені на рис.1, 2 за групами компонентів.

На рисунку 1 показана зміна складу компонентів, що характеризують економічність процесу горіння при перемінному коефіцієнті витрати окислювача.

У діапазоні $\alpha > 1$ мається залишкова концентрація продуктів неповного згорання (CO , H_2), що обумовлено явищем дисоціації. Їхнє догорання відбувається дуже повільно, незважаючи на наявність надлишкового кисню, причому кількість CO та H_2 при горінні з рециркуляцією димових газів мало відрізняється від згорання палива у повітрі.

Однак спостерігається й істотна відмінність. Процес повного згорання природного газу з рециркуляцією димових газів зміщується убік дещо більших значень коефіцієнта витрати окислювача ($\alpha = 1.08$) у порівнянні з горінням у повітрі. Ймовірний вмісту надлишкового кисню при $\alpha > 1,1$ у 2, 4 рази нижче вмісту кисню при горінні у повітрі.

Вміст окису азоту з рециркуляцією димових газів у порівнянні з горінням у повітрі знижується в 2-4 рази в залежності від значення коефіцієнта витрати окислювача. Це можна пояснити падінням температури горіння та кількості надлишкового кисню у газах, що виходять з топкових пристроїв.

Наведені дослідження показали, що умови оптимального згорання природного газу з рециркуляцією продуктів згорання при мінімізації топкових втрат та токсичності димових газів суттєво відрізняються від горіння у чистому повітрі: процес повного згорання "зміщується" убік дещо більших значень коефіцієнта витрати окислювача за рахунок зменшення концентрації кисню у продуктах згорання, при цьому викиди токсичних компонентів суттєво знижуються, наприклад, концентрація оксиду азоту знижується у 3...4 рази, концентрація двооксиду вуглецю – на 8...12 відсотків.

Різний характер зміни концентрацій компонентів димових газів від коефіцієнтів надлишку повітря та рециркуляції вимагає більш ретельного вибору режиму горіння, точного визначення оптимального управління, як що порівнювати його з горінням у чистому повітрі, що у кожному окремому випадку обирається рішенням задачі оптимізації.

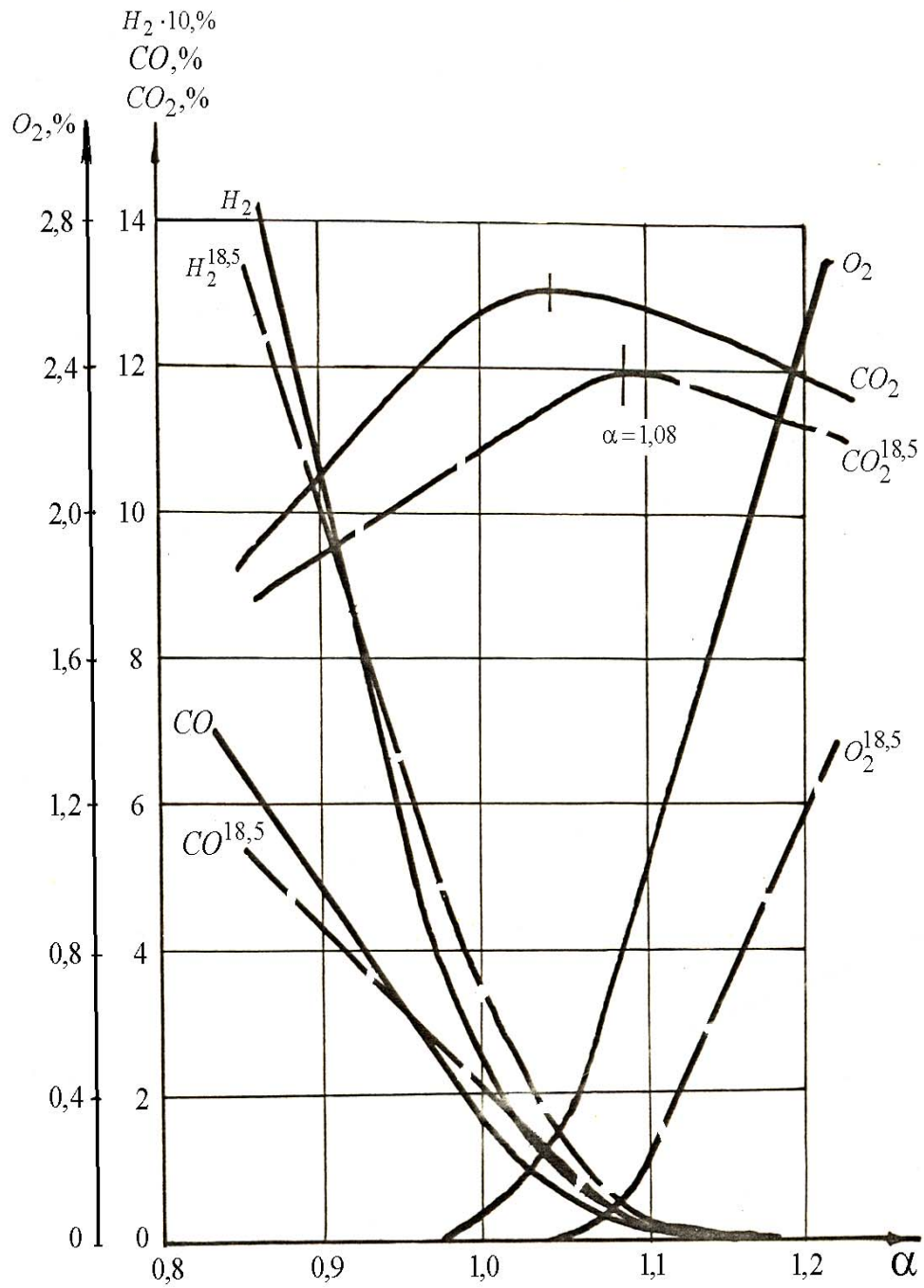


Рис. 1 Зміна складу компонентів, що характеризують економічність процесу горіння при перемінному коефіцієнті витрати окислювача

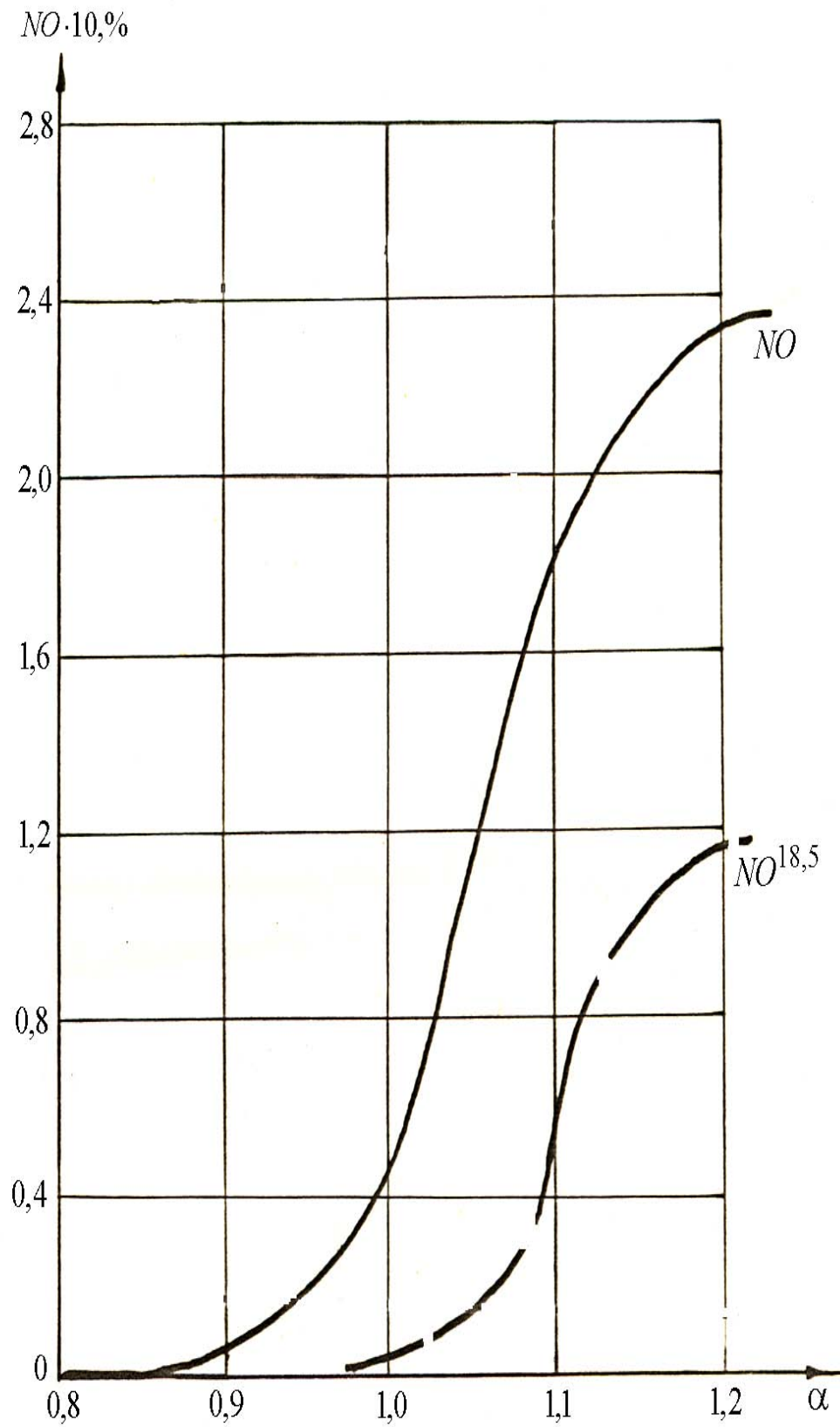


Рис. 2 Зміна складу окису азоту у продуктах спалення при перемінному коефіцієнті витрати окислювача

The article deals with the process of burning of the natural gas with the recirculation of products of combustion on the basis of solutions of the accepted system of equations of chemical thermodynamics which allows to define rather a detailed composition of smoke gases. The results allow to solve the questions of control of the process of burning on the basis of the generalized ecological economic criterion of optimization.

1. Цирульников Л.М. О возможности оптимизации топочного процесса в газомазутных котлах. – Теплоэнергетика, 1979, №6, с. 52-54.
2. Рыжиков Ю.Г., Тодорцев Ю.К. Минимизация токсичности выбросов при управлении сжиганием мазута в топках паровых котлов. Сб. научных трудов №109. – М. Моск. энерг. ин-т, 1986. С. 44-50.
3. Киреев В.А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. – М. Химия, 1975.
4. Лушпа А.И. Основы химической термодинамики и кинетики химических реакций. – М.: Машиностроение, 1981. – 240 с.
5. Алемасов В.Е. Теория ракетных двигателей. – М.: Гостехиздат, 1963, - 476 с.
6. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). Под ред. Кузнецова и др. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.
7. Офердиев Т.Б. Образование оксидов азота в газомазутных парогенераторах. – Теплоэнергетика, 1975, № 9

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.627

**АЛГОРИТМ СЖАТИЯ ИНФОРМАЦИИ БЕЗ ПОТЕРЬ:
МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ LZ77**

Шеховцов А.В., Везумский А.К., Середа Е.С.

Введение. Количество информации необходимой человечеству в повседневной работе неуклонно растет. Объемы устройств, для хранения данных и пропускная способность линий связи также растут. Однако, количество информации растет намного быстрее. Данная проблема может быть решена 3 способами.

Первый – ограничение количества информации. К сожалению, он не всегда приемлем. Например, для изображений это означает уменьшение разрешения, что приведет к потере мелких деталей и может сделать изображения вообще бесполезными (например, для медицинских или космических изображений).

Второй – увеличение объема носителей информации и пропускной способности каналов связи. Это решение связано с материальными затратами, причем иногда весьма значительными.

Третий способ – использование сжатия информации. Этот способ позволяет в несколько раз сократить требования к объему устройства хранения данных и пропускной способности каналов связи без дополнительных издержек (за исключением издержек на реализацию алгоритмов сжатия). Условиями его применимости является избыточность информации и возможность установки специального программного обеспечения либо аппаратуры как вблизи источника, так и вблизи приемника информации. Как правило, оба эти условия удовлетворяются.

Первые теоретические разработки в области сжатия информации относятся к концу 40-х годов. В конце семидесятых появились работы Шеннона, Фано и Хафмана.

Необходимость сжатия информации в вычислительных сетях вытекает из того, что пропускная способность каналов связи более дорогостоящий ресурс, чем дисковое пространство, по этой причине сжатие данных до или во время их передачи очень актуально.

Здесь целью сжатия информации является экономия пропускной способности и в конечном итоге ее увеличение.

Все известные алгоритмы сжатия сводятся к шифрованию входной информации, а принимающая сторона выполняет дешифровку принятых данных.

Существуют методы, которые предполагают некоторые потери исходных данных, другие алгоритмы позволяют преобразовать информацию без потерь.

— Сжатие с потерями используется при передаче звуковой или графической информации, при этом учитывается несовершенство органов слуха и зрения, которые не замечают некоторого ухудшения качества, связанного с этими потерями.

— Сжатие информации без потерь осуществляется статистическим кодированием или на основе предварительно созданного словаря. Статистические алгоритмы (напр., схема кодирования Хафмана) присваивают каждому входному символу определенный код. При этом, наиболее часто используемому символу присваивается наиболее короткий код, а наиболее редкому - более длинный. Таблицы кодирования создаются заранее и имеют ограниченный размер. Этот алгоритм обеспечивает наибольшее быстродействие и наименьшие задержки. Для получения высоких коэффициентов сжатия статистический метод требует больших объемов памяти.

Постановка задачи. Известны основные типы избыточности, которые перечислил в своей работе Т. Велч [1]:

- а) избыточность распределения событий (разные события имеют разные вероятности);
- б) избыточность повторения событий (несколько одинаковых событий могут следовать друг за другом);
- в) избыточность цепочек событий (цепочки событий могут повторяться);
- г) позиционная избыточность – повышение вероятности появления определенных событий в некоторых позициях потока событий (например, в записях базы данных).

Приведенная классификация составлена в 1984 г. и практически не устарела, однако нуждается в некоторых дополнениях.

В представленной работе предлагается математическая модель, которая учитывает дополнительные условия избыточности и на основе существующего алгоритма сжатия текстовой информации без потерь разрабатывается новый алгоритм [1].

Дополнение 1. Классификация ориентирована в первую очередь на символьные источники информации. Нетекстовым источникам данных характерны свои виды избыточности. Например, графическим данным характерна пространственная избыточность, характеризующаяся высокой вероятностью близости не только значений соседних пикселей, но и их пространственных производных.

Дополнение 2. Избыточность цепочек событий может быть представлена альтернативным способом – как избыточность распределения событий после наступления некоторого количества непосредственно предшествующих событий. Практические реализации, основанные на таком подходе, обеспечивают заметно более высокую степень сжатия, чем просто устраняющие цепочечную избыточность.

Для начала рассмотрим метод группового кодирования: подавление нулей. Это один из старейших способов, который исключал избыточность типа б, упоминавшейся ранее. В данном методе текст сканируется на наличие повторяющихся символов. Если количество повторяющихся символов было более 3, то алгоритм заменял данную строку двухсимвольным кодом.

Пример: строка XYZ**bbbb**QRA заменялась на следующую строку — XYZ**S**5QRA.

Однако данный алгоритм имеет ряд недостатков. Один из наиболее важных недостатков — способность данного алгоритма устранять избыточность лишь одного типа символов. В факсимильной связи к примеру, это недостатком не является, что видно из рис. 1: присутствуют лишь чёрные и белые пиксели.

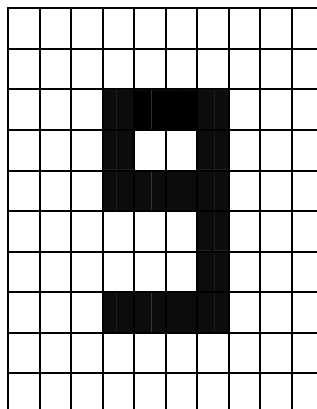


Рис. 1

Следующим шагом будет рассмотрение метода группового кодирования, исключая недостатки предыдущего метода, в котором напомним, происходило подавление избыточности лишь одного типа символов. Данный алгоритм предлагает заменять повто-

рения трёхсимвольным кодом. На рис. 2 иллюстрируется применение данного метода к символьным данным. Здесь используются следующие обозначения:

- Sc — специальный символ, указывающий на то, что за ним следуют сжатые данные;
- X — любой повторяющийся символ;
- Cc — счётчик символов, то есть количество повторений сжатого символа.

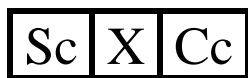


Рис. 2 Формат сжатия при групповом кодировании

Примеры сжатия при групповом кодировании приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходная строка данных	Кодированная строка данных
\$*****55.72	\$Sc*1055.72
-----	Sc-10
Sereda*****Eugen	SeredaSc*10Eugen

Таким образом, данный метод позволяет сократить место, занимаемое любой последовательностью из четырёх и более одинаковых символов.

Рассмотрим алгоритм LZ77. Пусть имеется следующая бессмысленная фраза: *the brown fox jumped over the brown foxy jumping frog*. Длина этой фразы 53 байта, то есть 424 бита.

Алгоритм обрабатывает этот текст слева направо. Вначале каждый символ преобразуется в 9-битовый код, состоящий из двоичной единицы, за которой следует 8-битовое ASCII-представление символа. Во время обработки текста алгоритм ищет повторяющиеся последовательности.

Когда встречается повторяющаяся последовательность, алгоритм ищет конец такой последовательности, то есть каждый раз алгоритм отыскивает как можно больше символов. Первой такой последовательностью является *the brown fox*. Повторяющаяся последовательность заменяется указателем на первый экземпляр последовательности и длиной этой последовательности. В данном случае последовательность *the brown fox* встречается на 26 позиций раньше и имеет длину 13 символов. Для данного примера рассмотрим два варианта кодирования: 8-битовый указатель и 4-битовая длина или 12-битовый указатель и 6-битовая длина. При этом 2-битовый заголовок указывает, который вариант выбран: 00 означает первый вариант, а 01 — второй вариант. Таким образом, второй экземпляр последовательности *the brown fox* кодируется как <00_b>,<26_d><13_d> или 00 00011010 1101.

Оставшиеся части сжатого сообщения представляют собой букву *y*, последовательность <00_b><27_d><5_d>, заменяющую последовательность, состоящую из пробела, за которым следует строка *jump*, и последовательность символов *ing frog*.

На рис. 3 иллюстрируется преобразование алгоритма сжатия. Сжатое сообщение состоит из 35 9-битовых символов и двух кодов, то есть всего из $35 \cdot 9 + 2 \cdot 14 = 343$ бит. Таким образом, при 424 бит в несжатом сообщении коэффициент сжатия данного метода в этом примере составил 1,24.

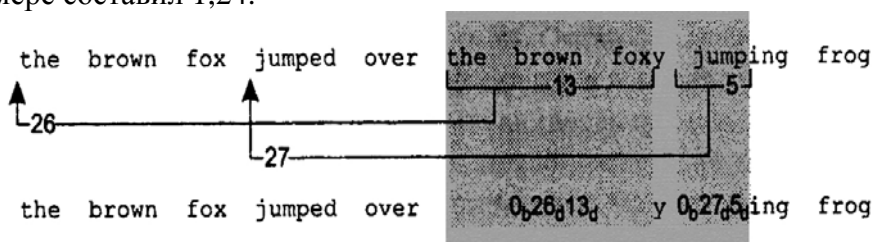


Рис. 3 Пример работы метода LZ77

Основная концепция. В процессе совершенствования существующих алгоритмов сжатия данных без потерь было обосновано выведено, что если отдельные кодируемые символы встречаются в исходном тексте с вероятностью P_i , то в лучшем случае мы можем использовать для каждого символа код длины L_i , удовлетворяющей следующему неравенству:

$$\log(1/P_i) \leq L_i < \log(1/P_i) + 1 \quad .1$$

Здесь P_i представляет собой вероятность, с которой i -ый символ встречается в исходных данных, а L_i — длину двоичного кода, которым кодируется данный символ. Исходя из неравенства (1) можно показать, что:

$$H(X) \leq E[L] < H(X) + 1 \quad . .$$

Здесь $H(X)$ представляет собой энтропию множества символов X , а $E[L]$ является средней длиной кода для множества X . В схеме сжатия без потерь $H(X)$ всегда будет нижней границей объёма сжатых данных, так как $H(X)$ определяет среднее количество информации, содержащейся в символьном наборе.

Согласно дополнению 2, приведённому в данной работе, эффективность алгоритма сжатия данных может быть повышена путём объединения символов и одновременного кодирования блоков по K символов каждый. В результате получаем следующее неравенство:

$$H(X) \leq \frac{E[L]}{K} < H(X) + \frac{1}{K} \quad . .$$

Таким образом, существует способ повышения эффективности алгоритма сжатия. Если нам нужно отправить сообщение длиной в N символов, мы можем использовать блок длиной N символов. Таким образом, мы обращаемся с каждым сообщением как с одним из M^N возможных результатов, где M представляет собой количество атомарных символов, а N — длину сообщения.

Решение поставленной задачи. Как уже было оговорено ранее, эффективность алгоритма сжатия данных может быть повышена путём объединения символов и одновременного кодирования блоков по K символов каждый.

Пусть дан нам следующий текст: “ABCABEFJAB”, который состоит из 10 символов, а это в свою очередь 10 байт или 80 бит.

Алгоритм LZ77 предположим кодирует 1 способом: весь текст преобразуется в 9-битовый код, за которой следует 8 битовое ASCII-представление представление, а остальные кодированные блоки преобразует в 14 битовый код, состоящий из: 2 бит заголовка, 8 битового указателя и 4 битовой длины.

Итого, для данного текста общий размер будет: $6 \cdot 9 + 2 \cdot 14 = 82$ бита, что на 2 бита больше незакодированного сообщения.

Заархивировав данное сообщение с помощью архиватора WinRar версии 7,0 beta 2, получил следующие результаты, смотри рис. 4. Как видно из рисунка, размер сжатого сообщения вышел 79 байт, что составляет 632 бита.

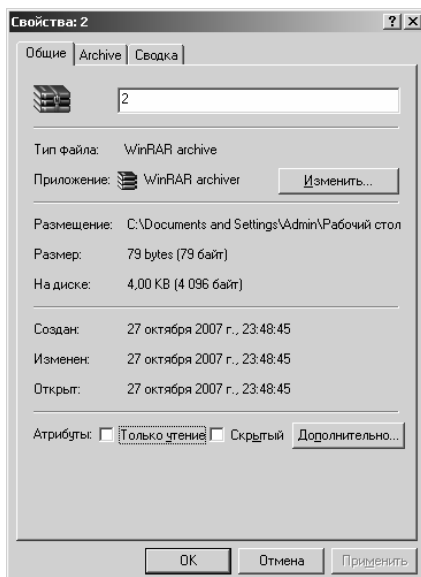


Рис. 4 Сжатие исходного текста с помощью WinRar

Теперь рассмотрим предложенный алгоритм, модифицированный метод сжатия LZ77. Здесь весь текст преобразуется в 9-битовый код, за которым следует 8 битовое ASCII-представление символа.

Закодированный текст будет выглядеть так:

<0 _β > A	<0 _β > B	<0 _β > X	1 <02 _d >	<0 _β > E	<0 _β > Ф	<0 _β > 9	1 <02 _d >
---------------------	---------------------	---------------------	----------------------	---------------------	---------------------	---------------------	----------------------

Как видно, перед каждым символом, добавлен бит: 0 — символ незакодирован, а 1 — символ закодирован. Обозначение <02_d> означает число 02 в десятичном коде. После небольших манипуляций, получим 2 числа (0 и 2), где:

- 0 — позиция начала блока;
- 2 — количество символов в блоке.

Таким образом, мы получим 8 символов по 9 бит каждый, это 72 бита на весь текст. Исходя из полученного результата, степень сжатия для такого столь малого текста составляет 1,1111. Делая вывод, можно сказать, что полученный модифицированный алгоритм позволяет получить наилучшие показатели степени сжатия для малых текстов.

Однако, даже на этом этапе, можно обнаружить недостаток синтезированного алгоритма — максимальный показатель счётчика будет равен 9, и максимальное значение символов в блоке также будет равно 9.

Решить данную проблему можно следующим путём: преобразуем в 9-битовый код весь текст, за которым следует 8 битовое ASCII-представление символа. Теперь кодирование будет представляться следующим форматом: <x><y><z>, где:

- <x> — это 1 бит указывающий закодирован символ или нет;
- <y> — указывающий, какой вариант кодирования используется (I или II);
- <z> — закодированный символ.

Отличия II вариант от I не особенно значительны, за исключением того, что все символы перекодируются в 9-битовый код, размер кода составит 12 бит, что позволяет нам использовать уже 99 позиций для смещения счётчика и 9 символов в блоке.

Для проверки работоспособности данного алгоритма и сравнения его работы, рассмотрим пример, когда передаётся сообщение по факсимильной связи. Пусть дана следующая последовательность, представленная в таблице 2.

Таблица 2.

Исходная последовательность

0000000000000000000000000000000011110000001001000000111100000000010000000001000000111100000000000000000000000000
--

Закодируем данную последовательность с помощью алгоритма LZ77, причём будем кодировать блоками по 3 символа и только нули. В результате мы получим: 24 блока по 3 символа, и 19 символов преобразованных в 9-битный код. В результате мы получим: $24*14+19*9=336+171=507$ бит, степень сжатия при этом будет составлять 1.5779

Рассмотрим работу представленного алгоритма. Результатом кодирования в первом случае будет: $(24+19)*9=387$ бит, а степень сжатия будет 2,0671. Во втором варианте кодирования результат будет следующий: $(24*12)+(19*9)=288+171=459$ бита, а степень сжатия в данном случае будет равной 1,7429.

Этот же тип данных, сжатый с помощью оговоренного ранее программного обеспечения WinRAR в результате получил размер, равный 102 байтам, что в свою очередь составляет 816 бит, что намного больше размера исходных данных.

Заключение. Необходимо учитывать, что при устранении одних видов избыточности, другие виды избыточности, присущие тому же потоку событий, могут исчезать (например, после устранения в потоке символов избыточности типа “а” устранить другие типы избыточности не представляется возможным) или сохраняться (например, при устранении избыточности типа “б” может сохраняться избыточность типа “а”, хотя ее характеристики несколько меняются). Кроме того, в выходном потоке при устранении определенных видов избыточности могут появляться новые виды избыточности.

Учитывая новые условия избыточности, был предложен модифицированный алгоритм сжатия данных без потерь на основе уже существующего алгоритма LZ77. Экспериментальные исследования наглядно продемонстрировали эффективность модифицированного алгоритма.

Использование данного алгоритма позволит достичь более высоких результатов сжатия информации передаваемой в факсимильной связи, а тем самым, сократить время для передачи сообщения и расходы при междугородней и международной связи.

In the presented work it is offered to enter additional conditions of redundancy. One of additional conditions consists that: redundancy of chains of events can be presented by alternative way - as redundancy events after approach of quantity previous events. The practical realizations based on such approach, provide noticeably higher degree of compression, than simply eliminating chained redundancy. On the basis of existing algorithm of compression of the text information the new algorithm which has shown higher degrees of compression unlike other considered algorithms lost-free is developed.

1. Современные компьютерные сети. 2-3 изд. / В. Столингс.—СПб.:Питер, 2003.—783с.
2. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман— М.: Высш. шк., 2000.—250с.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ

Гасанов А.С.

Введение

Одной из важнейших задач прогнозирования состояния технических систем является прогнозирование отказов в реальном времени. Решение этой задачи позволяет избежать больших материальных и человеческих потерь, связанных с непредвиденной поломкой сложных механизмов и машин, отказами их отдельных узлов.

На основании анализа литературных источников установлено, что еще недостаточно разработана теория и методы реализации робастных систем прогнозирования отказов (СПО), функционирующих в реальном времени [1-7]. Если модель характеризуется достаточной степенью адекватности, статистические характеристики внешних возмущений известны и объект стационарный, то проектирование СПО не связано с большой трудностью. Вместе с тем необходимо отметить, что физические объекты и процессы, а также реализация СПО для них, как правило, связаны с наличием неопределенностей различного характера, которые могут существенно повлиять на процесс диагностирования и локализации местоположения отказа. Это могут быть неопределенности значений оценок параметров объекта и неопределенности статистического характера относительно характеристик случайных возмущений и шума измерений. В связи с этим необходимо различать отказы, которые возникают вследствие наличия неопределенностей, так как они могут восприниматься как отказ объекта. Эту проблему называют проблемой робастности вследствие наличия неопределенностей. В общем случае робастность – это достаточно важная характеристика систем контроля и управления. Она определяет возможности системы определять отказы вне зависимости от влияния погрешностей моделирования (погрешностей оценок параметров), а также неизвестных (неизмеренных) возмущающих воздействий. Построение робастных систем обнаружения отказов является проблемой, которая требует самого неотлагательного решения.

Для построения таких систем предложено два подхода: (а) на основе классических моделей в пространстве состояний и оптимального фильтра и (б) на основе нейросетей различной структуры [8, 9]. Метод прогнозирования динамики временного ряда на совместном использовании линейного фильтра Калмана и соотношения правдоподобия (СП) использован для прогнозирования динамических систем и локализации возможных отказов их функционирования.

Постановка задачи. В случае (а) известна линейная стохастическая модель динамики объекта управления в пространстве состояний, описывающая функционирование объекта в условиях влияния случайных возмущений состояний и шумов измерений:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{G}\mathbf{w}(k), \quad (1)$$

$$\mathbf{z}(k) = \mathbf{H}\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k), \quad (2)$$

где $\mathbf{x}(k) \in \mathfrak{R}^n$ – вектор состояния объекта; $\mathbf{u}(k) \in \mathfrak{R}^m$ – вектор сигналов управления; $\mathbf{z}(k) \in \mathfrak{R}^r$ – вектор наблюдений выходящих сигналов; $\mathbf{w}(k) \in \mathfrak{R}^p$ и $\mathbf{v}(k) \in \mathfrak{R}^m$ – взаимно независимые последовательности гауссова шума с нулевыми средними и ковариациями \mathbf{Q} и \mathbf{R} , соответственно (считается, что они известны или могут быть оценены в процессе эксплуатации системы управления). Начальное значение вектора состояния $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ – случайная гауссова переменная с известным средним; при этом $E[\mathbf{x}(0)\mathbf{w}(k)] = 0$, $E[\mathbf{x}(0)\mathbf{v}(k)] = 0$, $\forall k$. На основе известной математической модели, про-

цедуры оптимальной фильтрации и СП необходимо построить робастный алгоритм определения отказов системы управления.

В случае (б) необходимо выбрать структуру нейросети для построения системы обнаружения отказов линейного или нелинейного динамического объекта, который функционирует в условиях влияния случайных внешних возмущений и при наличии шумов измерений. В отличие от рассмотренного выше случая модель динамики (1), (2) в данном случае неизвестна.

Предположим, что в случае повреждения объекта и/или измерительной системы, матрицы модели изменятся на величины $\Delta \mathbf{A}$, $\Delta \mathbf{B}$ и $\Delta \mathbf{H}$. Это говорит о том, что в уравнении динамики или в уравнении измерений появляется составляющая $\Delta \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \Delta \mathbf{B} \mathbf{u}(k)$ или $\Delta \mathbf{H} \mathbf{x}(k)$. Например, в случае повреждения объекта, уравнение его динамики принимает вид:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{B} \mathbf{u}(k) + \mathbf{G} \mathbf{w}(k) + \sigma(k+1, \tau) \mathbf{f}(k),$$

где τ – момент времени, когда появляется повреждение; $\mathbf{f}(k)$ – n -мерная вектор-функция, которая характеризует повреждение; $\sigma(k, \tau)$ – единичная ступенчатая функция, которое принимает значение 1 при $k \geq \tau$. По аналогии описывается повреждение датчика. Для оценки состояния системы использован линейный фильтр Калмана [8]. В нормальном режиме функционирования последовательность невязок, обозначим $\nu(k)$, представляет собой гауссову последовательность белого шума с нулевым средним и ковариацией $\mathbf{V}(k)$, то есть $E[\nu(k)] = 0$. При появлении повреждения влияние функции $\mathbf{f}(k)$ на обновленную последовательность можно представить в виде следующего соотношения:

$$\nu(k) = \nu^0(k) + \Delta \nu(k; \tau), \quad (3)$$

где $\nu^0(k)$ – нормальный режим работы; $\Delta \nu(k; \tau)$ равен

$$\Delta \nu(k; \tau) = \mathbf{F}^0(k; \tau) * \mathbf{f}(k) = \sum_{j=0}^k \mathbf{F}^0(k; j) \mathbf{f}(j-1). \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{F}^0(k; \tau)$ – матрица, элементы которой отображают влияние функции $\mathbf{f}(k)$ на динамику объекта; символ (*) означает операцию свертки. С помощью выражений (3) и (4) можно определить влияние повреждения на систему управления путем анализа характеристик невязок, которые изменяются в результате наступления повреждения или отказа. Функцию $\mathbf{f}(k)$ описывают с помощью ступенчатой функции $\beta \sigma_\nu(k; \tau_0)$ ($\beta \in \mathfrak{R}^n$), где σ_ν – стандартное отклонение невязки фильтра. Оценку максимального правдоподобия (ОМП) $\beta(k; \tau_0)$ находят в предположении, что вектор β ступенчатая функция $\beta \sigma_\nu(k; \tau_0)$ и момент времени τ_0 связаны следующим СП:

$$l(k; \tau_0) = \ln \left[\frac{P(\nu^k / H_1, \tau_0, \beta(k; \tau_0))}{P(\nu^k / H_0)} \right]. \quad (5)$$

В выражении (5) невязки $\nu(k)$ относятся к моментам времени $\tau_0 \leq j \leq k$; гипотезы H_0 и H_1 относятся к состояниям системы без повреждения и с повреждением, соответственно. При реализации данного подхода, СП вычисляется для выбранного окна данных $\tau = [k-m, k-n]$, которое оказывает содействие повышению вероятности правильной классификации ситуации, при которой возникает повреждение. СП является тем индексом, который позволяет определить появление аномалии в системе управления. Для вычисления индекса СП предлагается выражение:

$$l(k; \tau_0) = (1/2) \beta^T(k; \tau_0) \mathbf{C}(k; \tau_0) \beta(k; \tau_0), \quad (6)$$

где $\beta(k; \tau_0) = \mathbf{C}^{-1}(k; \tau_0) \sum_{j=\theta_0}^k \mathbf{F}^T(j; \tau_0) \mathbf{V}^{-1}(j) \mathbf{Y}(j)$;

$$\mathbf{C}(k; \tau_0) = \sum_{j=\theta_0}^k \mathbf{F}^T(j; \tau_0) \mathbf{V}^{-1}(j) \mathbf{F}(j; \tau_0); \quad \mathbf{F}(j; \tau_0) = \sum_{i=\theta_0}^j \mathbf{F}^0(j; i).$$

ОМП $\beta(k; \tau_0)$ имеет гауссово распределение с математическим ожиданием β_0 и ковариацией $\mathbf{C}^{-1}(k; \tau_0)$. При этом распределение вероятностей для СП $l(k; \tau_0)$, которое определяется выражением (6), представляет собой смещенное распределение χ^2 с n степенями свободы и параметром смещения $\delta^2(k; \tau_0) = \beta_0^T \mathbf{C}(k; \tau_0) \beta_0$. Можно показать, что $\delta^2(k; \tau_0)$ представляет собой квадратичную норму функции $\mathbf{F}(j; \tau_0) \beta_0$. Эта функция оптимально аппроксимирует влияние повреждения $\Delta v(j; \tau)$ на интервале $[\tau_0, k]$ в случае применения гипотезы относительно ступенчатой функции. Обозначим это распределение как $\chi^2(n, \delta^2)$. С другой стороны, если считать, что значение $\delta^2 = 0$, то получим распределение χ^2 с n степенями свободы как распределение, которое характеризует СП в случае нормального функционирования системы. Таким образом, надежность распознавания ситуации наличия повреждения зависит от разности между двумя следующими распределениями: $\chi^2(n, \delta^2)$ и $\chi^2(n)$. Применение данного метода выявления повреждений и отказов в АСУ предусматривает, что известна точная модель объекта управления. Однако на практике это предположение, как правило, не выполняется. Поэтому значение индекса СП может быть довольно большим даже в режиме нормального функционирования системы.

Графический анализ наличия повреждения в системе управления представлен на рис. 1 (1 соответствует нормальному распределению без повреждения; 2 – с повреждением).

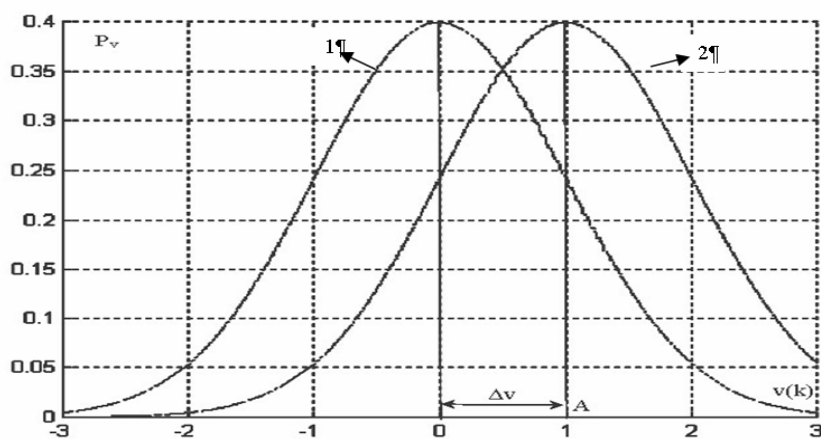


Рис. 1 Графики разности параметров распределений

Структурная схема метода прогнозирования на основе адаптивного фильтра Калмана и СП представлена на рис. 2.

Логический блок анализа состояния двигателя анализирует отклонение математического ожидания невязки от нуля и рассчитывает СП и сравнивает его с пороговым значением.

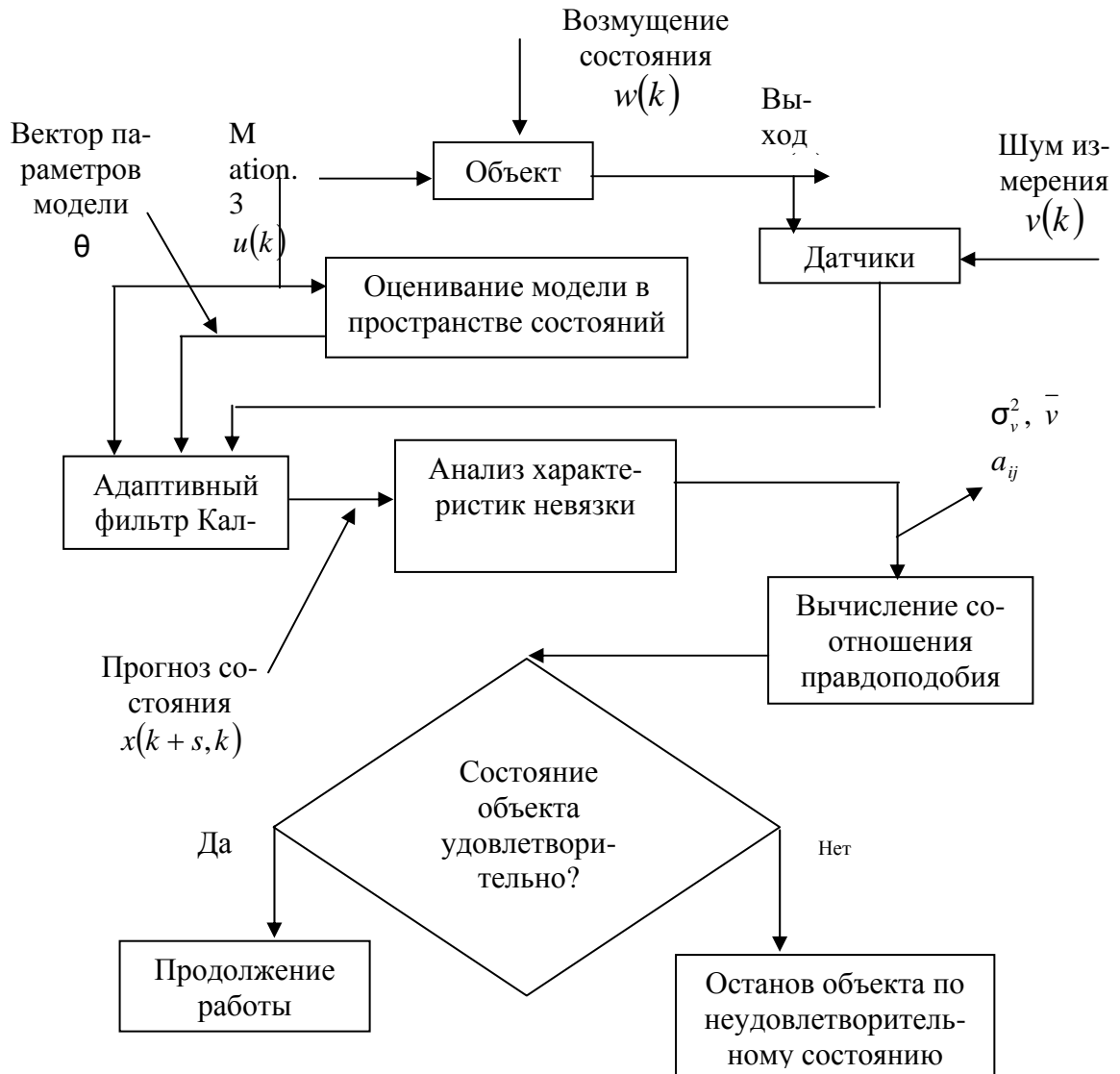


Рис. 2 Структурная схема метода прогнозирования

Структурная схема процесса диагностики двигателей (рис. 3) включает следующие модули: адаптивный фильтр Калмана, который оценивает кроме состояний $x(k)$ – ковариации возмущения состояния и шумы измерения. Его задача – использовать модель объекта в пространстве состояний для генерирования прогноза вектора состояний на один и более шагов прогнозирования; переменную фильтра v , которая является невязкой, и должна иметь в нормальном режиме работы объекта следующие статистические характеристики: $v(k) \approx N(0, \sigma_v^2)$, нулевое среднее; $\sigma_v^2 < C = const$. Если работа объекта нарушается, то $E[v(k)] \neq 0$ и дисперсия σ_v^2 возрастает. На этих свойствах строится распознавание состояние объекта (σ_v – стандартное отклонение фильтра).

Предложенный метод на основе модели объекта в пространстве состояний и оптимального фильтра был применен к построению диагностической системы для электроприводов [10]. При этом исследовались следующие отклонения от нормы: колебания напряжения переменного тока, шум в подшипниках и вибрации (табл. 1).

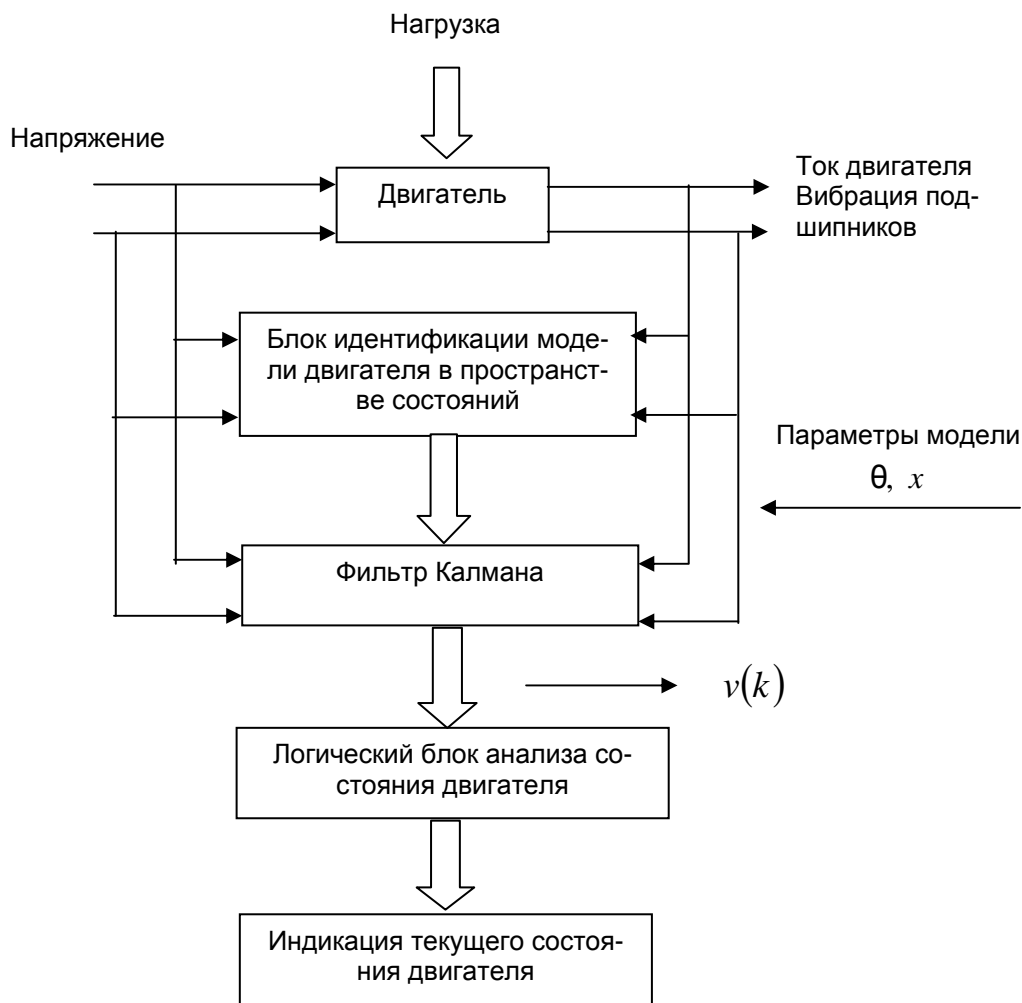


Рис. 3 Структурная схема процесса диагностики

Таблица 1

Результаты диагностики по выбранным классам

Экспертная диагностика		Диагностика на основе фильтров			
		Нормальный режим	Шум	Колебания напряжения	Вибрации
Нормальный режим	15	13 (87% правильно)	-	-	2
Шум	12	-	11(97% правильно)	-	1
Колебания напряжения	7	-	-	7(100% правильно)	-
Вибрации	11	-	2	-	9 (82% правильно)

При исследовании режимов функционирования электроприводов с механическими повреждениями установлено, что ситуации, связанные с наличием шума, коррелируют с ситуациями, в которых присутствуют вибрации, осложняющие диагностику. Причина такой корреляции может состоять в использовании (для сравнения) экспертных оценок диагноза, на которых основывалось использование того или другого фильтра. Очевидно, что вибрации могут вызывать шум и эксперты по ошибке причисляют электропривод с вибра-

циями к классу тех случаев, когда присутствуют шумы. В результате такого взаимного пересечения классов возникают ошибки диагноза.

Если принять результаты экспертной диагностики, приведенной в таблице 1, за достоверные, то диагностику на основе фильтров можно оценить как достаточно удовлетворительную. Так достоверность идентификации нормального режима соответствует 0,87 (или 87%), достоверность наличия шумов – 92%, колебаний напряжений – 100% и вибраций – 82%.

Таким образом, полученные результаты диагностирования электродвигателей при помощи множества фильтров, имеют высокую степень достоверности. В результате экспериментального исследования не было зарегистрировано ни одного случая ошибочной диагностики режима нормального функционирования и режима с наличием повреждения. В то же время главная проблема при применении фильтров возникает при распределении повреждений на классы. Неправильного распределения повреждений физической системы на классы можно избежать путем более глубокого предварительного исследования возможных типов повреждений и соответствующих параметров, которые их характеризуют. Сформулированы требования к СППР, включающие ситуацию для принятия решения, базирующуюся на информационной поддержке, динамике задачи, критериях оценки и прогнозирование отказов (рис. 4).

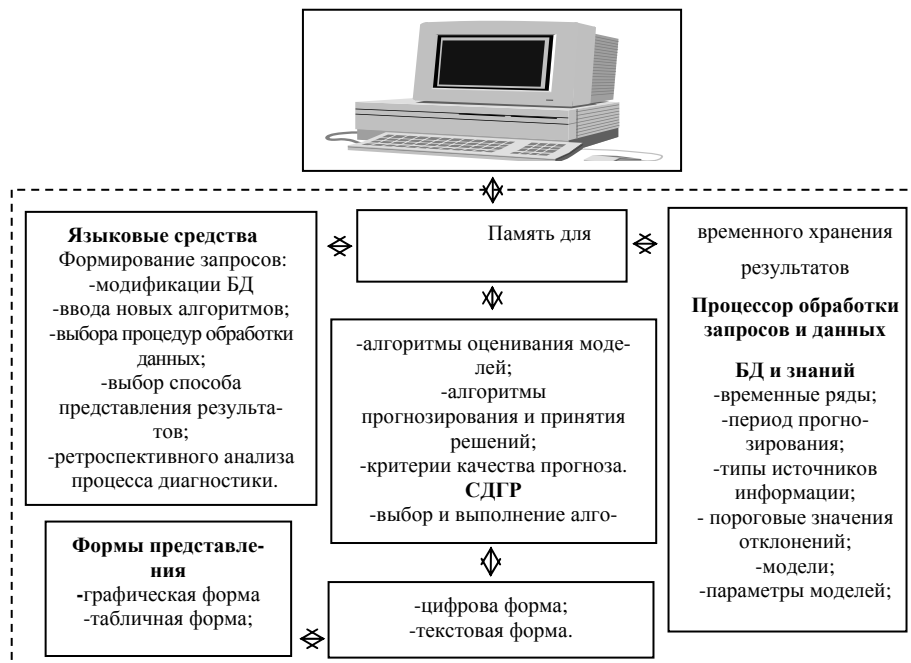


Рис.4. Структурная схема СППР

На базе этих требований предлагается структура СППР, включающая: подсистему ввода данных, базу данных и знаний, подсистему обработки данных и генерацию результатов. Для проектируемой СППР вычислительными процедурами будут являться: методы предварительной обработки данных; методы вычисления прогнозов; вычисление критериев качества модели и прогнозов; построение графических представлений исходных данных и результатов. При прогнозировании отказов необходимо, чтобы выбранный метод был робастным. Результаты имитационного моделирования электропривода и робототехнической системы свидетельствуют о высокой степени робастности предложенного подхода, что подтверждено компьютерным моделированием с использованием реальных данных.

Выводы. Для решения задач технической диагностики применяют различные по своей идеологии методы, но на сегодня нет надежных методов, которые позволили бы правильно диагностировать систему с вероятностью, близкой к единице. Поэтому предложен новый подход на основе фильтра Калмана и соотношения правдоподобия. Практически с помощью этого метода удастся автоматически обнаружить выход за допустимые границы всех основных физических параметров систем управления. Система позволяет повысить вероятность правильной диагностики в сравнении с известными подходами, в среднем на 25 – 30%.

The problem of designing failure detection and localization systems for dynamic systems is considered. Two approaches are proposed to solve the problem: model-based approach that uses state-space representation and optimal Kalman filter. Recommendations are developed for neural nets application to failure detection and localization, and examples of application are given. Tabl.: 1. Figs.: 4. Refs.: 10 titles.

1. Бассвиль М., Банвениста А. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем. – М.: Мир, 1989. – 278 с.
2. Васильев В. И., Гусев Ю. М., Ефанов В. Н. и др. Многоуровневое управление динамическими объектами. – М.: Наука, 1987. – 307 с.
3. Коваленко И. И., Бидюк П. И., Баклан И. В. Системный анализ и информационные технологии в управлении проектами. - Киев: "Экономика и право", 2001. – 270 с.
4. Frank P.M. Fault diagnosis in dynamic system using analytical and knowledge based redundancy. – A survey and some new results. // Automatic.-1990.- Vol. 26, N 3.- P. 459–474.
5. Patton R.J., Lopez-Toribio C.J., Uppal F.J. Artificial intelligence approaches to fault diagnosis for dynamic systems // Int. J. of Applied Math. and Comp. Sci.-1999, Vol. 9, N. 3.-P. 471–518.
6. Tanaka S. Failure detection of linear dynamic systems by a generalized likelihood ratio method based on a detectability analysis / Proc. 8th IFAC/IFORS Symp. on Identification and System Parameter Estimation.-1988.-Vol. 3.-P. 1141–1146.
7. Tanaka S., Muller P.C. Fault detection in linear discrete systems by a pattern recognition of a generalized likelihood-ratio // Trans. ASME, Dynamic Systems, Measurement and Control.-1990.-Vol. 112.-N. 3.-P. 276–282.
8. Бидюк П.И., Баклан И.В., Гасанов А.С. Проектирование систем обнаружения и локализации местонахождения отказов на основе модельного подхода // Математичні машини і системи. – 2004. – № 2. – С. 79 – 91.
9. Гасанов А.С. Моделирование робастных систем прогнозирования отказов для принятия решений // Міжнародна наукова конференція “Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій (ISDMIT’2007)” Зб. наук. праць в 3 томах.–Евпаторія, 2007.–Т. 2.–С. 24–36.
10. Янг С, Эллисон А. Измерение шума машин: Пер с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 144 с.

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ.

Грицик В.В.

Вступ

В комп'ютерних технологіях (штучний інтелект, автоматизовані системи розпізнавання, проектування автономних систем реагування тощо) задачі розпізнавання та класифікації образів є дуже актуальними. Це зумовлено не тільки складністю опису об'єкту розпізнавання, його виділення з фону на дискретному полі уваги і потребою застосування, а й тим, що близько 85 відсотків інформації людина сприймає очима (відповідно в науково-технічних розробках питанню переробки і розпізнаванням візуальної інформації приділяється велика увага) [1]. Автоматичні розпізнавання і класифікація потрібні при автоматизації на виробництві, при управлінні роботами в медичних і військових застосуваннях, при спостереженні з супутників, системах безпеки, автоматизованих системах розпізнавання та ідентифікації, а також при роботі з персональними комп'ютерами, зокрема при пошуку цифрових зображень [2].

Особливої актуальності застосування штучних нейронних мереж набуває в умовах невизначеності, де є взаємне перекриття класів. Що спричиняється неповнотою інформаційного базису, суперечливістю даних та іншими факторами [3].

Існуючі сьогодні методи попередньої обробки зображень не забезпечують проведення паралельного перетворення, що істотно обмежує область їх застосування і, зокрема унеможлиблює використання відомих методів перетворення, які не враховують паралелізм та ієрархію структури відео даних при обробці зображень [4]. Тому, оскільки, кожна штучна нейронна мережа розпізнавання має фіксовану роздільну здатність, то для її правильного функціонування вхідне зображення потрібно приводити до певного стандартизованого виду [5, 6, 7].

Постановка задачі

Стандартизація об'єктів (приведення вхідного зображення до виду, що є оптимальним для розпізнавання штучною нейронною мережею).

Алгоритми перетворення

Перше, що необхідно зробити для вирішення поставленої задачі – це сформулювати послідовність кроків, що будуть виконуватись автоматизованою інформаційно-аналітичною системою розпізнавання:

1. завантаження в автоматизовану систему (АС) зображення/образу, яке містить об'єкт класифікації чи навчання. При цьому зображення (образ) може мати довільну роздільну здатність;
2. алгоритм мінімізації поля уваги виконує виділення фрагменту зображення, який містить об'єкт розпізнавання; При цьому автоматично система визначає фон вхідного зображення;
3. реалізація алгоритму розпізнавання.

На першому етапі вирішується задача приведення вхідного зображення до виду, що забезпечить роботу системи. Наприклад, при робочому полі нейронної мережі 3×7 програма повинна поділити об'єкт на 21 рівну частину з подальшим відтворенням кожної з них у відповідних пікселях зображення (метод А):

1. вхідне зображення ділиться на 21 рівний фрагмент (по три у рядку);
2. в межах кожного з фрагментів виконується обчислення відсотка заповнення його чорними пік скелями (Q);

3. якщо коефіцієнт Q більший або рівний відносно заданої користувачем межі P , (де P – коефіцієнт мінімальнонеобхідного заповнення), то дана область відображається на результуючому зображенні у вигляді чорного пікселя, в іншому – у вигляді білого;

Таким чином утворюється стандартизоване зображення придатне для використання штучною нейронною мережею. Приклад роботи такого перетворення з коефіцієнтом $P=5\%$ показано на рис.1 (а,б):



Рис. 1а. Вхідне зображення високої роздільної здатності



Рис. 1.б. результат стандартизації

Третій етап – автоматизованого розпізнавання було реалізовано за таким алгоритмом (метод В):

1. визначається середня лінія вхідного зображення;
2. визначається коефіцієнт h поділу – величина рівна відношенню (на першому етапі $H =$ висота зображення $b = 7$):

$$h = \frac{H}{b}$$

- де : H – висота ще не розділеної на фрагменти частини вхідного зображення;
 b – кількість ще не утворених рядів фрагментів (ряд містить по три фрагменти);
3. Визначивши коефіцієнт h виконується сканування зображення вздовж його середньої лінії попередньо запам'ятавши значення яскравості стартового пікселя цього процесу (x);

4. Сканування відбувається допоки не виконається одна з двох умов :

$$\begin{cases} x <> pot \\ t = h \end{cases}$$

- де : pot – яскравість поточного пікселя перебору;
 x – яскравість стартового пікселя сканування;
 t – кількість перебраних пікселів;

5. Координата y знайденої межі запам'ятовується. Після цього відбувається обчислення і запам'ятовування параметрів нової ітерації поділу (h – при $H=t$, $b=b-1$; $x=pot$); Індикатор пошуку t обнулюється і все починається спочатку;

6. Ознакою завершення поділу по рядках є отримання таким чином шести меж, сьома межа задається кінцем зображення;

7. Таким чином відбувається поділ зображення по рядках. У свою чергу, поділ по стовпцях на три частини відбувається як і при поділі по рядках – на рівні частини.

Отже, при поділі зображення на фрагменти даний метод керується пошуком перепадів. Це дозволяє краще відобразити в результуючому полі ті зображення об'єктів, які не можна відтворити за методом A (див. рис. 2.а., 2.б. та 2.в.).

Як видно з наведеного прикладу в деяких випадках набагато ефективніше використовувати метод B перетворення. Ця необхідність виникає тоді, коли щільність ліній об'єкту перетворення в окремих його місцях значно менша за його висоту загалом. В таких випадках метод A не зможе правильно відобразити об'єкт.



Рис. 2.а Вхідне зображення для перетворення



Рис. 2.б Результат перетворення методом А при вхідному параметрі $P=10$



Рис. 2.в Результат перетворення за методом В при аналогічному значенні вхідного параметру P

Висновок

На даному етапі експериментальної розробки вдалось вирішити задачу попереднього перетворення вхідного образу, який не містить завад. Серед цих задач – стандартизація об'єктів довільної роздільної здатності, а також формування більш поглиблених знань про класи об'єктів.

Проте запропонований підхід має ряд вад:

- його можна застосовувати лише для вхідних зображень, що не містять завад;
- він залишається мало адаптивним, оскільки, відсутній інструментарій формування знань про нові класи;
- його роздільна здатність не дозволить працювати із складнішими об'єктами (літерами і спеціальними символами) є дуже низька роздільна здатність нейронної мережі.

Однак, при всіх цих вадах, запропонована методика дозволяє надійно і швидко класифікувати цифрову інформацію.

In article presents results of experiments of application of neural networks at the decision of a problem of preliminary processing images of an entrance image which does not contain handicapes, and also influence of preliminary processing of the image which contains the digital information for its further classification.

1. Боюн В.П. Интеллектуальні відео системи та пристрої реального часу. – МК Интеллектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій. – 14-18.05.2007. – Ст.101-107.

2. Дэвид Форсайт, Жан Понс “Компьютерное зрение. Современный подход” // Пер. с англ. – М.: Издательский дом “Вильямс”, 2004. – 928с.: ил. - Парал. Тит. Англ.

3. А.В. Дорошенко. “Нейромережевий розв'язок задач класифікації в умовах неповноти інформаційного базису” // Модельовання та керування станом еколого-економічних систем регіону. – Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем. – Випуск 3, 2006. – Ст.114-121.

4. В.П. Кожем'яко, Л.О. Волонтер, С.В. Дусанюк “Паралельний алгоритм утоншення бінарних зображень”. – Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології №2(12), 2006. – В-во: Вінницький національний технічний університет. – С.26-32.

5. Станислав Осовский “Нейронные сети для обработки информации” // М. «Финаны и статистика». – 2004. – 343С.

6. В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов “Нейронные сети и их применение в системах управления и связи” // . – М.: Горячая Линия-Телеком, 2003. – 94с.

7. Кватер Тадеуш. Нейромережеві інформаційні технології контролю та діагностики динамічних об'єктів в умовах невизначеності. – Львів.: Видавництво Тараса Сороки, 2005. – 270с.

УДК 681.518.52:544.023.523 002.56

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА ИЗМЕРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА МОДЕЛИ ЗАМКНУТОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ОБЪЕМА

Кириллов О.Л., Якимчук Г.С., Якимчук С.Г.

Введение

Во время транспортирования нефтепродуктов с внутренним сопротивлением выше $\rho > 10^9 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ в технологическом оборудовании происходит генерация зарядов статического электричества (СЭ), которая в свою очередь возбуждает электростатическое поле (ЭСП) в заполняемой технологической емкости. Процесс изучения полей, созданных зарядами в замкнутых объемах, определяет свойства безопасности технологии и требует диагностирования при выборе уровня режимов производительности заполнения. В качестве исследуемого параметра в технологических емкостях могут выступать напряженность поля (E), потенциал (φ) и заряд ($Q_{\text{п}}$) поверхности заполняемой жидкости [3,4].

В настоящее время [5] диагностирование параметров проводится с помощью зондов различной конфигурации в паре с интеграторами тока [5,6]. Альтернативным прибором зонду предлагается модуляторный измеритель электростатического потенциала (МИЭП), который способен измерять те же параметры поля, но при меньших конструктивных и системных затратах на разработку, поскольку определена непосредственная электрическая связь его с исследуемым полем в виде [7,8]:

$$\sigma = Q/S, \quad (1)$$

где σ – поверхностная плотность заряда жидкости, $\text{Кл}/\text{м}^2$; Q – заряд между электродами МИЭП, Кл ; S – площадь электрода МИЭП, м^2 .

Тогда напряженность ЭСП выглядит:

$$E = \varepsilon\varepsilon_0\sigma = \varepsilon\varepsilon_0U \cdot C/S. \quad (2)$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость исследуемой жидкости; $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ – электрическая постоянная, $\text{Ф}/\text{м}$; U – потенциал поверхности исследуемой жидкости, В ; C – емкость между электродами МИЭП, Ф .

Формула (2) показывает взаимосвязь параметров E, U, C, S преобразователя с напряженностью и потенциалом исследуемой замкнутой технологической емкости. При рассмотрении принципиальной и эквивалентной схем МИЭП (МИЭП изолирован от источников энергии и его заряд задан [8,9]) можно определить потенциал на входе преобразователя, который зависит только от собственной емкости в виде:

$$U = Q/C. \quad (3)$$

Следовательно, данный прибор может быть отградуирован в измеряемых величинах, необходимых как для проведения диагностирования потенциала поверхности заполняемой жидкости, так и для измерения напряженности электрического поля внутри замкнутого объема [6-8].

Постановка задачи

Изучив современные подходы к процессу диагностирования параметров электрического поля в замкнутых объемах [5,6], приходим к следующему:

- невозможна непосредственная диагностика исследуемых величин поля прямым контактом с исследуемой поверхностью;
- оценка заряда в слабо проводящих, заряжающихся жидкостях (СПЗЖ), позволяют судить о достаточно высокой величине накопленной энергии в жидкости, которая способ-

на, при прямом контакте с приборами к высвобождению в виде разряда, что запрещено по исследуемой технологии;

- сравнение подходов к измерениям, производимым по данной тематике в Московском энергетическом институте (МЭИ) [5] и центральном научно-исследовательском институте судовой электротехники и технологии (ЦНИИ-СЭТ) [6], применение МИЭП в качестве датчика, имеет предпочтение использования, в связи с простотой конструкции, возможностью дистанционных замеров и минимизации самого прибора, при одинаковых возможностях получаемых данных.

В связи с этим создание и проверка поведения модуляторного измерителя во время диагностирования параметров поля в замкнутом объеме является актуальной задачей [10].

Цель работы

Целью данной работы есть проверка возможности измерения вышеуказанных параметров дистанционным образом для построения диагностического компонента системы управления заполнением замкнутых объемов СПЗЖ.

Решение задачи

Теоретическое исследование поля в замкнутом объеме определяется уравнениями Пуассона и Лапласа [4-6]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon}, \tag{4}$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0, \tag{5}$$

Поскольку решается краевая задача, то для нее задаются граничные условия, исходя из физики процесса. Исследование стационарных полей, в зависимости от типа граничных условий, сводят к расчету 3-х краевых задач [6].

Задача Дирихле:

$$U|_r = f_1(r) \tag{6}$$

Задача Неймана:

$$\frac{\partial U}{\partial n}|_r = f_2(r), \tag{7}$$

Задача Робена:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial n} + kU \right)|_r = f_3(r), \tag{8}$$

где f_1, f_2, f_3 – функции заданные на r области, в которой решаются уравнения (4,5); n – нормаль к поверхностям (r – области).

При рассмотрении поверхностей: $f_1(r) = const$ – поверхность эквипотенциальная; $f_2(r) = 0$ – поверхность непроницаемая.

В дополнение к описанию (6...8), в качестве дополнительных условий используют условия периодичности и согласования [11].

Условие периодичности определяется постановкой задачи, откуда априори следует периодичность пространственного распределения поля, т.е. координатные поверхности относятся к одному семейству (r_1 и r_2), при которых:

$$\begin{aligned} U|_{r_1} &= U|_{r_2}, \\ \frac{\partial U}{\partial n}|_{r_1} &= \frac{\partial U}{\partial n}|_{r_2}, \end{aligned} \tag{9}$$

Условие согласования возникает при расчетах поля на границе различных сред и применяется для установки связи между полями в каждой из однородных подобластей. Данные условия могут быть выражены соотношениями:

$$U_i|_H = U_j|_H,$$

$$\frac{\varepsilon_i \partial U_i}{\partial n}|_H = \frac{\varepsilon_j \partial U_j}{\partial n}|_H, \quad (10)$$

где H – граница раздела i и j рассматриваемых областей; $\varepsilon_i; \varepsilon_j$ – материальные характеристики сред рассматриваемых областей.

В продолжение подтверждения теоретического обоснования (1...10) и проведения эксперимента по изучению поведения электрического поля в замкнутом металлическом объеме автором был создан прототип МИЭП и построена установка (рис.1) в масштабе 1:1000, по отношению к размерам реально заполняемого объема. Размеры: диаметр $d=160$ мм, высота $h=120$ мм, форма - цилиндр (1) с крышкой (2).

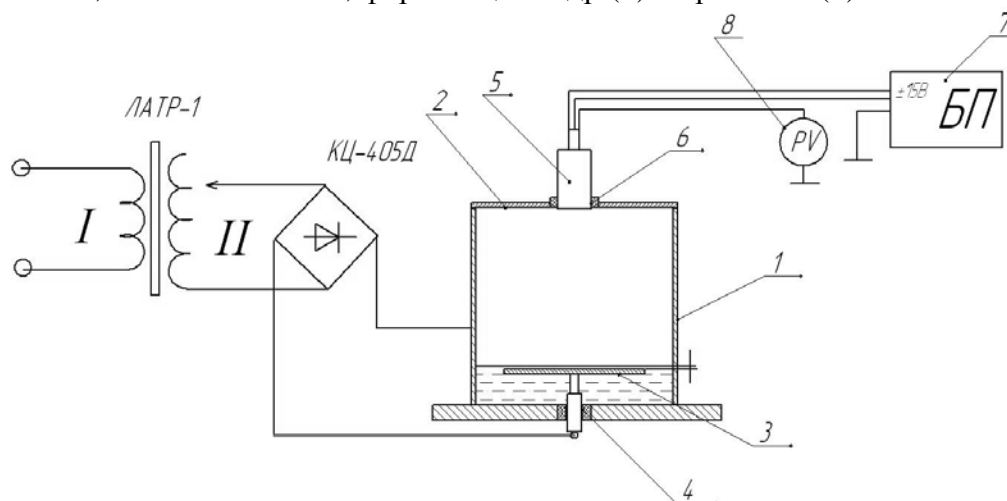


Рис.1. Экспериментальная установка для изучения поведения электрического поля внутри замкнутого металлического объема.

Конструкция установки. На оси дна цилиндра установлен телескопический электрод (3), в виде плоскости круглой формы диаметром $d=95$ мм, который позволяет перемещаться вдоль вертикальной оси цилиндра до уровня верхнего края, параллельно плоскости дна. Электрод (3) изолирован от дна с помощью диэлектрической шайбы (4) (материал политетрафторэтилен-4). Верхняя часть цилиндра закрыта крышкой (2) для создания Γ^* - поверхности, ограничивающей объем [6-12]. В центре верхней части крышки просверлено отверстие, в область которого помещен датчик (5), изолированный от корпуса крышки цилиндра диэлектрической шайбой (6), необходимой для реализации теоретических выводов (1...3) [7,13...16].

Регулируемое напряжение постоянного тока, создающее поле внутри объема, подводилось к установке через ЛАТР и выпрямитель КЦ-405Д. Параметры поля, создаваемого заряженной жидкостью, снимались с ее поверхности, под которой на глубине 1-2мм находился плоский электрод (3), эмулирующий величину потенциала поверхности жидкости [6,14]. В целях безопасности к установке подводилось напряжение в диапазоне $U=20-120$ В. Для снятия параметров поля использовался прототип МИЭП (5), который питался от двух полярного источника напряжения $U \Rightarrow \pm 15$ В БП (7). В процессе измерения МИЭП (5) показал способность генерировать выходное напряжение, по показаниям (8), в диапазоне $7 \div 14$ В.

Результат измерений потенциала поверхности СПЗЖ показан на графике (рис.2).

В отличие от МЭИ, где использовался подход регистрации разрядов [5] с поверхности СПЗЖ, в рассматриваемом случае регистрируется потенциал поверхности

СПЗЖ с помощью созданного прототипа МИЭП [7,8]. Результаты исследований приведены в таблице 1.

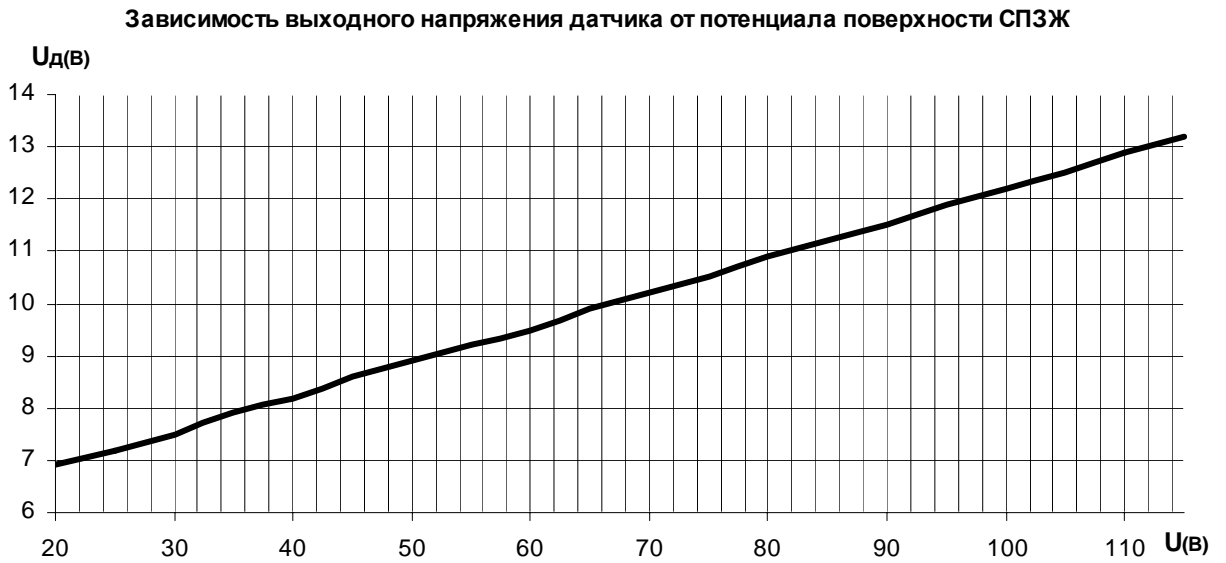


Рис.2. График реакции датчика на изменение напряженности поля внутри замкнутого объема

Таблица 1.

Результаты лабораторных исследований установки

U(В)	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
U _д (В)	6,9	7,2	7,5	7,9	8,2	8,5	8,9	9,2	9,5	9,9
U(В)	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115
U _д (В)	10,2	10,5	10,9	11,2	11,5	11,9	12,2	12,5	12,9	13,2

где U(В) – напряжение подводимое к металлическому цилиндру и телескопическому электроду; U_д(В)– напряжение, генерируемое датчиком.

Основные результаты и выводы

1. Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности данного вида преобразователя, существовании поля внутри замкнутого пространства, возможности моделирования процесса диагностирования потенциала поверхности СПЗЖ заполняемого пространства технологической емкости;
2. Табличные и графические данные показывают относительно линейную характеристику прототипа МИЭП в зависимости от создаваемой напряженности поля внутри замкнутого объема;
3. Изменение положения плоскости телескопического электрода (3) (рис.1) относительно дна объема, не вносили изменения в показания МИЭП;
4. Существенное изменение показаний прототипа МИЭП происходит в непосредственной близости диагностируемой поверхности от прибора (3...5мм), в результате чего возникает искажение формы поля [5,6], а значит и значений величин измеряемых параметров.
5. Таким образом, диагностирование потенциала исследуемых поверхностей на расстоянии более 10 габаритных размеров преобразователей согласуется с теоретическими выводами ЦНИИ-СЭТ [6] относительно проектирования и построения дистанционного измерителя параметров электрического поля заряженной исследуемой поверхности.

Заключение

Моделирование рассмотренного процесса утверждает возможность реального измерения напряженности или потенциала поля, подтверждая теоретические исследования (1...3) [7,13...16]. Датчик в замкнутом металлическом объеме реагирует на изменение потенциала поверхности заполняемой СПЗЖ с достаточно широким диапазоном выходного напряжения $\approx 7B$, что позволяет создать прибор для измерения заряда или потенциала поверхности СПЗЖ.

The given work - represents itself the analysis of a condition of theoretical and practical development on maintenance of an optimality of management with technological process of filling of the closed volumes badly spending charged liquids (BSCL) under condition of safety of process of filling. In work the interrelation of balances of an electrostatic field (EF) is considered at accumulation of charges on a surface Q_{Π} and $Q_{ж}$ inside BSCL and hydrodynamical process of filling of the closed volume. At construction of system of optimum control by filling BSCL in the closed volume, as observable parameter the potential of a surface of a filled liquid is investigated.

1. Україна. Закони. Про зовнішньоекономічну діяльність. Закон від 16.04.1991р. №960–XII // ВВР.–1991.–№29. –С.377.
2. Україна. Закони. Про ратифікацію Угоди про проведення узгодженої політики в галузі транзиту нафти і нафтопродуктів магістральними трубопроводами. Закон від 14.05. 1999р. № 666–XIV //ВВР.–1997–№ 31.–С.197.
3. Галка В.Л.. Метод построения зон работоспособности грузовой системы нефтеналивного судна. //Судоостроительная промышленность. Сер. "Судовая электротехника и связь". Вып. 11. Л., 1990.
4. Галка В.Л. Гидродинамические насадки для защиты грузовой системы танкеров // Судоостроение.-1993.№8-9.-С.21-23.
5. Максимов Б.К., Обух А.А., Тихонов А.В. Электростатическая безопасность при заполнении резервуаров нефтепродуктами. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 154с.
6. Галка В.Л. Электростатическая безопасность нефтеналивных судов и кораблей. СПб.: Элмор. 1998.– 188с.
7. Глазунов Л.П., Смирнов А.Н. Проектирование технических систем диагностирования. Л.: Энергоатомиздат, 1982. – 210с.
8. Илюкович А.М. Техника электрометрии. М.: Энергия. 1976. – 400 с.
9. Виглеб Г. Датчики. Устройство и применение. – Москва.: МИР, 1989.–195с.
10. О.Л. Кириллов, Г.С. Якимчук. Оптимальное управление технологическим процессом заполнения слабопроводящими заряжающимися жидкостями (СПЗЖ) замкнутых объемов //Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. ХГТУ. 2006-№1(17).
11. Математический энциклопедический словарь. - М.: Советская энциклопедия, 1988. - 848 с.
12. Галка В.Л. Электростатическая безопасность нефтеналивных судов. // Судоостроение.-1993.№2-3.-С.30-31.
13. Бенькович Е.С., Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б. Практическое моделирование диагностических систем – СПб.: БХВ – Петербург, 2002. –464с.
14. Галка В.Л. Техническая диагностика в задачах электростатической защиты грузовых систем нефтеналивных судов: Учеб. пособ. – СПб.: Академия судоостроения, 1998. –82с.
15. Калявин В.П., Мозгалевский А.В., Галка В.Л. Надежность и техническая диагностика судового электрооборудования и автоматики: Учебник. – СПб.: Элмор, 1996. –342с.
16. Мозгалевский А.В., Калявин В.П., Костанди Г.Г. Диагностирование электронных систем / Под. ред. А.В. Мозгалевского. – Л.: Судоостроение, 1984. –240с.

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕМ РЕСУРСОВ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЗНАЧИМОСТИ БИЗНЕС-ПРОЦЕССОВ

Ролик А.И.

Введение. В настоящее время в крупных корпорациях, государственных и правительственных структурах для повышения эффективности и динамичности бизнес-процессов и процессов деятельности используется большое количество разнообразных информационных технологий (ИТ). При этом отмечается переход к использованию процессного подхода в организации деятельности и управления ИТ, направленного в первую очередь на решение задач максимальной информационной обеспеченности руководства и бизнес-подразделений, сокращение затрат на содержание ИТ-инфраструктуры с одновременным повышением отдачи от ИТ. В больших организациях и корпорациях в основе регионально разветвленной ИТ-инфраструктуры лежит сложная информационно-телекоммуникационная система (ИТС), которая рассматривается как совокупность автоматизированной системы и телекоммуникационной сети. Для управления ИТС создаются и внедряются различные системы управления функционированием (СУФ) [1]. Наряду с решением задач управления информационными и телекоммуникационными технологиями СУФ управляет распределением ограниченных ресурсов ИВС. Рассматриваемые в работе модели управления распределением ресурсов ИВС, нацеленные на повышение эффективности функционирования всех приложений и решения задач пользователей с учетом важности бизнес-процессов делают настоящую работу актуальной.

Постановка проблемы в общем виде. На сегодняшний день в ИТ-индустрии практически нет систем управления, которые бы позволяли включать все ИТ-компоненты в единую систему, полностью управлять и контролировать ИТС как единым целым, и при этом, что самое важное, обеспечивать такое интегрированное управление ИТС, которое бы адекватно и своевременно отвечало текущим динамически меняющимся требованиям бизнеса. Системы управления ИТС получаются, как правило, идеологически разрозненными и часто представляют собой совокупность слабо связанных подсистем управления отдельными приложениями, системами, технологиями и оборудованием. Каждая из используемых в корпоративных ИТС информационных и телекоммуникационных технологий может иметь собственную систему управления, работающую независимо от других систем управления. При этом разрозненные системы управления решают только собственные задачи и, как правило, совершенно не учитывают проблемы, возникающие в других системах. В этом случае системы управления, непосредственно управляющие отдельными технологиями, оборудованием или средствами и, опосредованно, отдельными бизнес-процессами, могут не учитывать значимость других бизнес-процессов и приоритеты приложений. Более того, разрозненные системы управления не могут учитывать изменение приоритетов приложений при изменении условий функционирования ИТС и меняющихся требований со стороны бизнес-процессов. Поэтому необходима разработка СУФ, которые будут обеспечивать интегрированное управление всеми информационными и телекоммуникационными технологиями ИВС с ориентацией на цели бизнеса корпорации.

Анализ последних исследований и публикаций. ИТ-инфраструктура современных крупных предприятий сложна и запутана. Увеличивается стоимость поддержки существующих ИТ-решений и, кроме того, постоянно приобретаются новые приложения для автоматизации бизнес-процессов. Современные бизнес-процессы не удовлетворяются просто доступом к общим информационно-вычислительным ресурсам ИТС, когда всем приложениям предоставляются равные права, а требуют дифференцированного подхода при выделении общих ресурсов с требуемым объемом и качеством, а также и индивиду-

ального обслуживания с предоставлением разных прав доступа. Все современные бизнес-процессы имеют различную потребность в разнообразных информационно-телекоммуникационных ресурсах, причем для повышения их эффективности и, исходя из экономических соображений, для многих бизнес-процессов задействуются одни и те же ресурсы (такие, как полоса пропускания телекоммуникационной сети, СУБД, базы данных, серверное оборудование и пр.). При этом требуемые объемы ресурса, а также необходимые и запрашиваемые условия предоставления ресурса отдельным приложением могут иметь существенную динамику, независимую от других приложений. В то же время, все ресурсы ИТС ограничены, а при одновременном обращении к общим ресурсам возникают конфликты, для разрешения которых средства управления ресурсом не всегда могут отдать предпочтение наиболее важному приложению по причине отсутствия информации о значимости приложений.

В работах [2,3] рассмотрены математические модели распределения ограниченных ресурсов ИТС, но распределение ресурсов осуществляется без учета появления новых задач. В [4] моделирование перераспределения ресурсов производится с учетом появления запросов от других приложений, но без учета динамики значимости бизнес-процессов.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы. В настоящее время отсутствует единая концепция создания системы управления корпоративной ИТС, а также отсутствуют четкие стандарты управления ресурсами ИТС. В [1] определены требования, которым должна удовлетворять интегрированная СУФ, определены ее структура и выполняемые функции. В тоже время для создания эффективной системы управления таким сложным распределенным объектом, как ИТС требуется решения большого числа различных задач — от описания структуры ИТ-подразделений, как это делает, например, библиотека ИТЛ в терминах бизнес-процессов, с определением ролей и действий подразделений ИТ-службы, связи между ними и необходимого взаимодействия, до разработки математических моделей, используемых в целях управления.

Современная СУФ, наряду с такими традиционными функциями как мониторинг и анализ работы оборудования и серверов, телекоммуникационных сетей, приложений, а также управления ими должна решать и такие важные задачи как управление распределением и перераспределением ограниченных ресурсов ИТС. Причем должна делать это с учетом требований, которые накладывает бизнес-деятельность предприятия. Актуальность данной проблемы обусловлена не только тем, что всегда возникает конфликт при обращении нескольких пользователей или запускаемых ими приложений к одному и тому же ресурсу, но и тем, что в любой ИТС обязательно рано или поздно складывается ситуация, когда ресурсы ИТС становятся ограниченными и приходится отдавать предпочтение одному из приложений. Ограниченность ресурсов может возникнуть при появлении и внедрении новых ИТ без инсталляции дополнительных ресурсов, выходе из строя или постановке на обслуживание серверов и оборудования ИТС, повышении стоимости и последующего снижения объемов потребляемых ресурсов, предоставляемых, например, операторами телекоммуникационных услуг, временном, но чрезмерном потреблении ресурсов одним из приложений или одной из ИТ, проявляющемся, например, в повышенной загруженности каналов связи, баз данных и пр. При управлении ИТС СУФ должна руководствоваться значимостью всех бизнес-процессов и, соответственно, поддерживающих их приложений, а также определением приоритетов выполняемых задач и оценкой их потребностей в общих ресурсах ИТС. Естественно, что в процессе повседневной деятельности любого предприятия значимости бизнес-процессов могут меняться. Эти изменения могут быть обусловлены как факторами, проявляющимися на организационном уровне, обусловленными изменениями бизнес-целей предприятия, конъюнктурой рынка, форс-мажорными обстоятельствами и пр., так и результатами оперативной диагностики ИТС. Например, если в результате катастрофического отказа станет недоступным сервер одного из приложений автоматизации деловых процессов, то в этом случае следует заблокировать работу связанных с ним сервисов, которые также не смогут функционировать, а вы-

свободившиеся ресурсы перераспределить между оставшимися приложениями, что могли бы взять на себя часть функций отказавшего приложения, но, естественно, с урезанной функциональностью.

Целью статьи является разработка математической модели управления перераспределением ресурсов ИТС при появлении новых задач, когда для своего выполнения они требуют части ресурсов, которые уже используются другими задачами или процессами. Модель учитывает важности всех задач и процессов, как тех, которые выполняются, так и новых, а также возможность изменения во времени приоритетов задач, обусловленных изменением значимости бизнес-процессов, которые они поддерживают.

Изложение основного материала исследования. Динамика значимости бизнес-процессов и, соответственно, приоритетов, необходимых для их решения задач и поддерживающих информационных технологий, может быть обусловлена как трансформацией целей бизнеса, при изменении конъюнктуры рынка, каких-либо катаклизмах и пр., так и при катастрофическом отказе фрагментов ИТС, делающих невозможным информационную поддержку отдельных бизнес-процессов. В этих и множестве других случаев происходит изменение значимости бизнес-процессов и, следовательно, приоритетов поддерживающих их ИТ-процессов, что в свою очередь влечет за собой необходимость перераспределения ресурсов ИТС. Изменения значимостей бизнес-процессов могут происходить динамично и носить стохастический характер, например, перерывы или отсутствие связи на стороне провайдера телекоммуникационных услуг, которыми активно пользуется предприятие, или, наоборот, быть предсказуемыми и планируемыми, например, на время проведения интернет-аукциона предприятию-организатору может потребоваться для этих целей существенно расширить полосу пропускания канала доступа в Интернет для процессов поддержки аукциона за счет ограничения доступа для других процессов.

Структура СУФ, способной оперативно реагировать на изменение значимости бизнес-процессов, приведена на рис. 1.

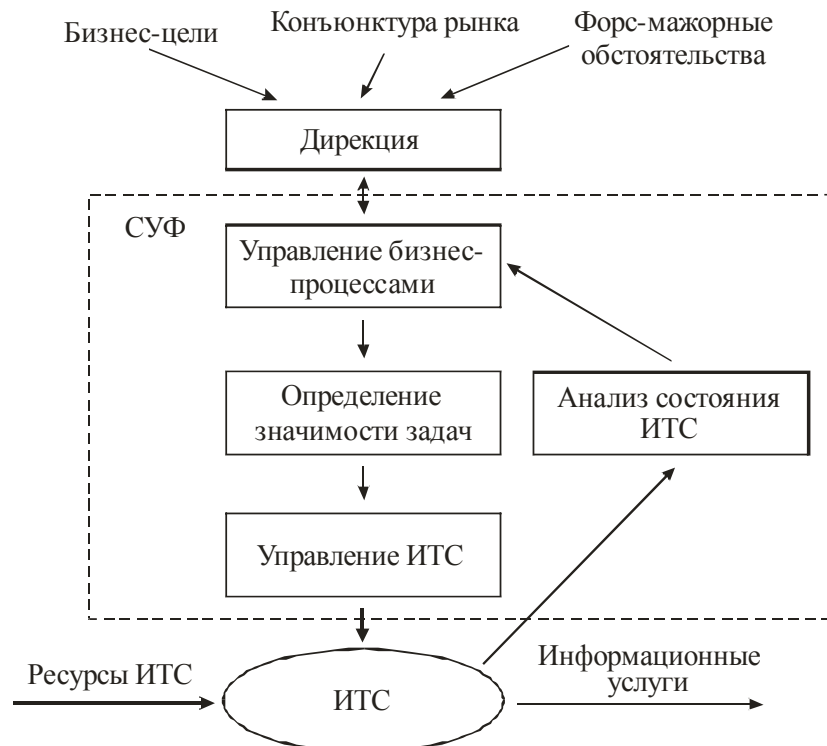


Рис. 1 Управление ресурсами ИТС при изменении значимости бизнес-процессов

В СУФ, призванной обеспечить комплексную автоматизацию бизнес-процессов предприятий со сложной ИТ-инфраструктурой, можно выделить два иерархических уровня. Верхний уровень управляет автоматизацией процессов деятельности, поддерживаю-

щих бизнес (на рисунке выступает в виде двух блоков — управления бизнес-процессами и определения значимости задач), а нижний (блоки управления ИТС и анализа состояния ИТС) — управляет как ИТ-технологиями, поддерживающими бизнес-процессы, так и работой компонентов ИТ-инфраструктуры — сетями, серверами, распределенными приложениями и пр., а также осуществляет анализ состояния ресурсов ИТС с целью определения качества работы компонентов ИТ-инфраструктуры. Такая СУФ призвана стать системообразующим началом создания единой интегрированной системы автоматизированного управления приложениями, непосредственно обеспечивающими процессы бизнеса, и необходимыми для их работы поддерживающими информационными и телекоммуникационными технологиями.

Из двух блоков нижнего уровня (см. рис.1) блок управления ИТС непосредственно распределяет ресурсы между всеми задачами, а также осуществляет управление не только отдельными элементами, но и процессами, поддерживающими бизнес. Этот модуль поддерживает показатели качества функционирования ИТС на заданном уровне и при изменении внешних условий изменяет показатели в ИТС, в частности, перераспределяет доступ приложений и задач к общим ресурсам ИТС. Кроме того, в задачи этого модуля входят и традиционные задачи управления телекоммуникационными сетями [5, 6].

Анализ состояния ИТС заключается в проведении мониторинга и анализа работы элементов и подсистем ИТС (телекоммуникационных сетей, серверов, баз данных и пр.), а также распределенных приложений и ИТ-сервисов. В задачи модуля анализа входит получение информации о качестве услуг ИТС, определение возможности предоставления ресурсов с требуемыми параметрами и пр. Результаты измерения параметров качества ИТ-сервисов должны быть переведены в термины бизнеса. Это сложная, но чрезвычайно важная задача позволяет трансформировать, например, данные о продолжительности отсутствия доступа к сети Интернет в финансовые потери от сокращения объемов продаж интернет-магазина.

При создании и функционировании СУФ необходимо обеспечить тесное взаимодействие между руководителями ИТ-служб и бизнеса не только на этапе проектирования, но и в повседневной деятельности. Кроме того, необходимо постоянно совершенствовать процессы и методы коллективной работы руководителей предприятия, ИТ-менеджеров, менеджеров производства, повысить качество работы ИТ, организовать эффективное использование ресурсов ИТС для обеспечения эффективного управления производственными процессами.

Ориентированный на бизнес-процессы подход к управлению ИТ-сервисами, предложенный компанией IDC [7], рассчитан на тесное взаимодействие менеджеров бизнеса различного уровня с ИТ-персоналом, включает в себя четыре этапа:

- идентификация всех бизнес-процессов предприятия и установление требований со стороны этих процессов к ИТ-сервисам;
- проецирование бизнес-процессов на компоненты ИТ-инфраструктуры с определением технических требований к технологическим элементам;
- определение метрик, позволяющих проверить соответствие качества услуг, обеспечивающих ИТ-инфраструктурой, требованиям бизнес-процессов;
- контроль качества ИТ-услуг в заданных метриках и составление различной отчетности, позволяющей оценить соответствие уровня обслуживания, предоставляемого ИТ-инфраструктурой, потребностям бизнеса.

Недостатком данного подхода является то, что он рассматривает только статическую ситуацию и предполагает, что соотношения значимостей бизнес-процессов не изменяются, так же как и остаются неизменными технологические, структурные и функциональные связи бизнес-процессов и ИТ-инфраструктуры.

В реальных ситуациях статическая модель годится только для решения части задач планирования или управления и не подходит для решения задач, связанных с перераспре-

делением общих ресурсов ИТС с целью адаптации к изменяющимся обстоятельствам ведения бизнес-процессов или условиям функционирования ИТС.

Предлагаемая модель управления перераспределением ресурсов ИТС построена с учетом того, что значимость бизнес-процессов может изменяться, а ресурсы ИТС ограничены. Предполагается, что компоненты ИТС распределены по значительной территории, а СУФ ИТС организационно является территориально-распределенной иерархической многоуровневой системой с центральным узлом (уровнем), координирующим работу региональных узлов и уровней.

На первом этапе на основании значимости бизнес-процессов определяются приоритеты поддерживающих их приложений и решаемых задач. На основании этой информации формируется новая политика управления, которая хранится в центральном узле и реплицируется в региональные узлы управления.

При изменении политики переопределяются приоритеты выполняемых задач и устанавливаются приоритеты новых задач. Изменение приоритетов выполняемых в данный момент задач, естественно, может сказаться на их успешном завершении — выполнение задач может быть немедленно прекращено или отложено. Что касается новых задач, то в зависимости от их приоритета им вообще может быть отказано в предоставлении ресурса. Все это определяется политикой управления, а также реальной ситуацией с ресурсами ИТС.

Далее определяются ресурсы, задействованные выполняемыми задачами, и устанавливаются объемы ресурсов, в которых нуждаются новые задачи. После чего происходит перераспределение ресурсов с учетом приоритетов задач и объемом задействованных и необходимых ресурсов при условии их ограниченности.

Для разработки математической модели введем следующие необходимые обозначения:

$H = \{h_i\}, i = \overline{1, n}$ — пространство, элементы которого — ресурсы и задачи ИТС. Такое объединение ресурсов и задач в единое пространство сделано потому, что задачи могут требовать ресурса, выделение которого порождает новые задачи. В пространство H включены все имеющиеся ресурсы ИТС и все возможные задачи, которые могут выполняться в ИТС для обеспечения работы имеющихся и планируемых распределенных приложений. При добавлении ресурсов вследствие расширения и модификации ИТС или установки новых приложений, которые не были предусмотрены, а также в случае безвозвратного удаления ресурсов или приложений, размерность пространства H соответственно увеличивается или уменьшается.

$Z = \{z_i\}, i = \overline{1, n}$ — подпространство пространства H , элементы которого — задачи, обеспечивающие функционирование процессов ИТС, которые, в свою очередь, обеспечивают эффективное функционирование приложений, поддерживающих бизнес-процессы;

$R = \{r_i\}, i = \overline{1, n}$ — подпространство пространства H , элементы которого — ресурсы, используемые задачами.

Для выбора ресурсов или задач из пространства H введем n -мерные вектора \overline{V}_r и \overline{V}_z , первый из которых определяет элементы ИТС, являющиеся ресурсами, а второй — элементы, являющиеся задачами. Элементы векторов принимают значения 0 или 1, причем 1 устанавливается на тех позициях, например, вектора \overline{V}_r , которые соответствуют ресурсам, а 0 — задачам.

Зададим w_1, \dots, w_n — коэффициенты важности ресурсов и задач. Эти коэффициенты определяются политиками управления, а при изменении политик претерпевают изменения.

Зададим матрицу использования ресурсов $P = \|p_{ij}\|, i, j = \overline{1, n}$, элемент p_{ij} которой определяет нормированный коэффициент использования элементом h_i элемента h_j .

Зададим вектор $\bar{X} = (x_1, \dots, x_n)$, который определяет задачи из подпространства Z , которые в данный момент выполняются, то есть:

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{если задача } z_j \text{ находится в стадии исполнения;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Зададим вектор $\bar{D} = (d_1, \dots, d_n)$, который определяет те задачи из матрицы P , выполнение которых может быть отменено для высвобождения ресурсов, или использование ими ресурсов может быть уменьшено для обеспечения решения новых задач, то есть:

$$d_j = \begin{cases} 1, & \text{если выполнение задачи } z_j \text{ можно отменить;} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Максимальная эффективность ИТС будет обеспечена СУФ тогда, когда будут выполняться самые важные задачи, то есть при достижении

$$\max \sum_{i=1}^n w_i x_i.$$

Данный критерий подразумевает достижение максимума суммарной важности задач, которые выполняются и планируются к выполнению с учетом новых значений коэффициентов важности, корректируемых при изменении политик управления.

Поскольку элемент p_{ij} в матрице P является нормированным коэффициентом использования задачей z_j ресурса r_j , то общий объем использования любого ресурса не может превышать единицу, то есть всегда будет выполняться условие:

$$\sum_{i=1}^n p_{ij} \cdot x_i \leq 1,$$

для всех $j = \overline{1, n}$.

Пусть появляется новая задача z'_k , $k = \overline{1, n}$, для которой предварительно выполнялось условие $x_k = 0$. Если для ее выполнения недостаточно ресурсов, то необходимо или высвободить ресурсы для выполнения z'_k , или принять решение, что z'_k не может быть выполнена, поскольку не имеет достаточную важность, с учетом политики ограничения на ресурсы, которая используется в СУФ в данный момент.

Определим количество r_j свободных ресурсов в ИТС:

$$r_j = 1 - \sum_{i=1}^n p_{ij} \cdot x_i,$$

для всех $j = \overline{1, n}$.

Для каждого ресурса r_j , необходимого для задачи z'_k , проверим выполнение условия:

$$r_j \geq p_{kj},$$

для всех $j = \overline{1, n}$, и если данное условие выполняется, то это говорит о том, что в ИТС имеется достаточное количество ресурсов, необходимых для решения задачи z'_k и дополнительное управление по перераспределению ресурсов не требуется.

Если в системе нет достаточного количества незадействованных ресурсов, необходимых для задачи z'_k , то СУФ осуществляет освобождение части ресурсов, занятых менее важными задачами.

Определим Δ_j , $j = \overline{1, n}$, как количество ресурса r_j , недостающего для решения задачи z'_k :

$$\Delta_j = r_j - p_{kj},$$

для всех $j = \overline{1, n}$.

Тогда для управления перераспределением ресурсов необходимо найти все такие задачи z_j , отмена которых освободит ресурсы, необходимые задаче z'_k .

Определим основные критерии, которые учитываются при решении этой задачи.

1. Изымать ресурсы у тех задач, суммарная важность которых минимальна:

$$\min \sum_{i=1}^n w_i d_i.$$

2. Прекращать выполнение наименьшего количества задач, которые находятся в стадии исполнения:

$$\min \sum_{i=1}^n d_i x_i.$$

3. При освобождении ресурса r_j может потребоваться прекращение выполнения некоторого количества низкоприоритетных задач, что, учитывая взаимозависимость ресурсов и задач, может привести к высвобождению некоторого ресурса r_{j^*} больше, чем это необходимо, что, в конечном итоге, приведет к снижению эффективности работы ИТС. Для предотвращения чрезмерного высвобождения ресурсов учитывается следующий критерий:

$$b_j = \sum_{i=1}^n p_{ij} d_i - \Delta_j; b_j \rightarrow \min; b_j \geq 0,$$

для всех $j = \overline{1, n}$, причем величина b_j — объем ресурса, который высвобождается, всегда будет положительной, поскольку требуется освободить ресурс не менее требуемого объема.

Для решения задач управления с учетом критериев 1—3, являющихся типовыми задачами комбинаторики — поиска некоторого набора элементов, удовлетворяющих заданным критериям, могут использоваться генетические алгоритмы.

Трудность быстрого поиска набора задач, которые удовлетворяют данным критериям, заключается в переборе большого количества комбинаций для каждого из ресурсов.

Для упрощения поиска введем параметр P_i^* , характеризующий значение усредненного использования ресурсов ИТС i -й задачей

$$P_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij} u_j}{n^*},$$

для $j = \overline{1, n}$, где n^* — количество ненулевых составляющих $p_{ij} u_j$, а u_j — определяет использование ресурса задачей z_j , причем

$$u_j = \begin{cases} 1, & \text{если задача } z_j \text{ использует ресурс } r_j; \\ 0, & \text{в противоположном случае.} \end{cases}$$

Введение параметра P_i^* сделано в предположении существования пропорциональной зависимости между коэффициентами использования различных ресурсов одной задачей, т.е. считается, что если задача z_j использует один из ресурсов с большим значением коэффициента, то и другие ресурсы также будут использоваться с большим коэффициентом. Например, если задача оперирует большими объемами данных, то она будет использовать и большие объемы памяти, необходимые для их хранения, большой процент процессорного времени для их обработки и пр.

При управлении для разрешения конфликта между новой задачей z'_k и задачами, уже использующими эти же ресурсы ИТС, в зависимости от значения P_i^* , возможны три варианта:

1. При $p_i^* = 0$ задача z_i использует ресурсы, на которые не претендует новая задача z'_k .

2. Если $p_i^* \ll p_k^*$, то задача z_i использует столь незначительные объемы ресурсов, на которые претендует задача z'_k , что удаление z_i не повлияет на решение проблемы.

3. В остальных случаях задача z_i использует значительные объемы тех же ресурсов, на которые претендует z'_k .

Таким образом, СУФ ИТС, осуществляя выделение ресурсов для новой задачи z'_k и перераспределение ресурсов между существующими задачами z_i при изменении политик, должна выполнять поиск задач, подлежащих удалению, среди тех исполняемых задач, которые могут высвободить достаточный объем ресурсов.

Учитывая, что поставленная проблема управления в реальных условиях требует больших вычислительных затрат, предлагается алгоритм ее решения, позволяющий существенно уменьшить перебор вариантов. Причем этот алгоритм дает точное решение за исключением тех случаев, когда один из коэффициентов p_{ij} существенно отклоняется от среднего значения p_i^* , что случается очень редко.

Суть алгоритма, который запускается каждый раз, когда возникает новая задача или происходит перераспределение приоритетов выполняемых, заключается в следующем.

Сначала все элементы сортируются по важности: $w_{i+1} > w_i$.

Среди элементов пространства N выделяются задачи: $Z = \bar{V}_z \times N$.

Исключаются из рассмотрения те задачи, важность w_i которых больше важности w_k задачи z'_k . Определяется i_{\max} — верхняя граница для рассмотренных задач.

Для каждой задачи рассчитывается среднее использование ресурсов p_i^* , $i = 1, 2, \dots, i_{\max}$.

Для высвобождения ресурсов удаляются задачи, удовлетворяющие одному из критериев:

1. Должны удаляться наименее важные задачи:

$$D_i = 1, \text{ если } \sum_{j=1}^i p_j^* < p_k^*, \text{ для } i = 1, 2, \dots, i^{\max}.$$

2. Должно быть удалено наименьшее количество задач:

$$D_i = 1, \text{ если } \sum_{j=i}^i p_j^* < p_k^*, \text{ для } i = i^{\max}, \dots, 2, 1.$$

3. Должны удаляться наиболее ресурсоемкие задачи с минимальной важностью. Для этого задачи сортируются по значению $q_i = p_i^* / w_i$, так, чтобы $q_{i+1} < q_i$, а потом делается выбор задач по второму критерию.

После определения задач, которые в принципе могут быть удалены, сравниваются объемы высвобождаемых ресурсов для каждого из ресурсов, и определяется ресурс с максимальным дефицитом $\max \Delta_j$. Определяется набор задач, которые блокируются для освобождения ресурсов по одному из приведенных выше критериев и заменяется p_j^* значением j -го ресурса.

Рассмотрим, каким образом СУФ, имеющая многоуровневую архитектуру, может решить проблему распределения ресурсов ИТС.

Каждый региональный узел СУФ управляет распределением ресурсов в своем регионе. При этом он руководствуется политиками, поступающими из центрального узла СУФ. В том случае, когда региональный узел получает запрос на выделение ресурса, на-

ходящегося в компетенции другого регионального узла, то происходит их взаимодействие через узлы СУФ более высоких уровней иерархии.

При этом обобщенный алгоритм работы узла СУФ A^m m -го уровня можно описать следующим образом.

Шаг 1. Узел A^m получает запрос на выделение ресурсов для задачи z'_k .

Шаг 2. Узел A^m разделяет множество необходимых ресурсов R_p из множества узла R_a , на два подмножества R_e и R_z .

$$R_e = (R_p \setminus R_{es}) \cap R_a;$$

$$R_z = (R_p \setminus R_{es}) \setminus R_a;$$

где R_e — множество ресурсов, закрепленных за данным узлом; R_z — ресурсы, находящиеся в ведении других узлов СУФ; R_{es} — ресурсы, зарезервированные узлами нижних уровней.

Шаг 3. Узел A^m определяет возможность выделения ресурсов множества R_e с учетом существующей на данный момент политики управления. Если все ресурсы могут быть выделены, то они выделяются. В противном случае узел A^{m+1} получает отказ. Все выделенные ресурсы идентифицируются в R_{es}

$$R_{es} = R_{es} + R_e.$$

Шаг 4. Если хотя бы один из ресурсов не закреплен за узлом (т.е. $R_z \neq \emptyset$), то посылается запрос узлу более высокого уровня иерархии.

Шаг 5. Если задача z'_k принадлежит множеству данного узла, то задача начинает выполняться, ей выделяются ресурсы и алгоритм завершается.

Шаг 6. Если все ресурсы выделены $R_{es} = R_p$, тогда выделить зарезервированные ресурсы $R_{es} \cap R_a$ и отправить запрос на выделение зарезервированных ресурсов узлу A^{m-1} .

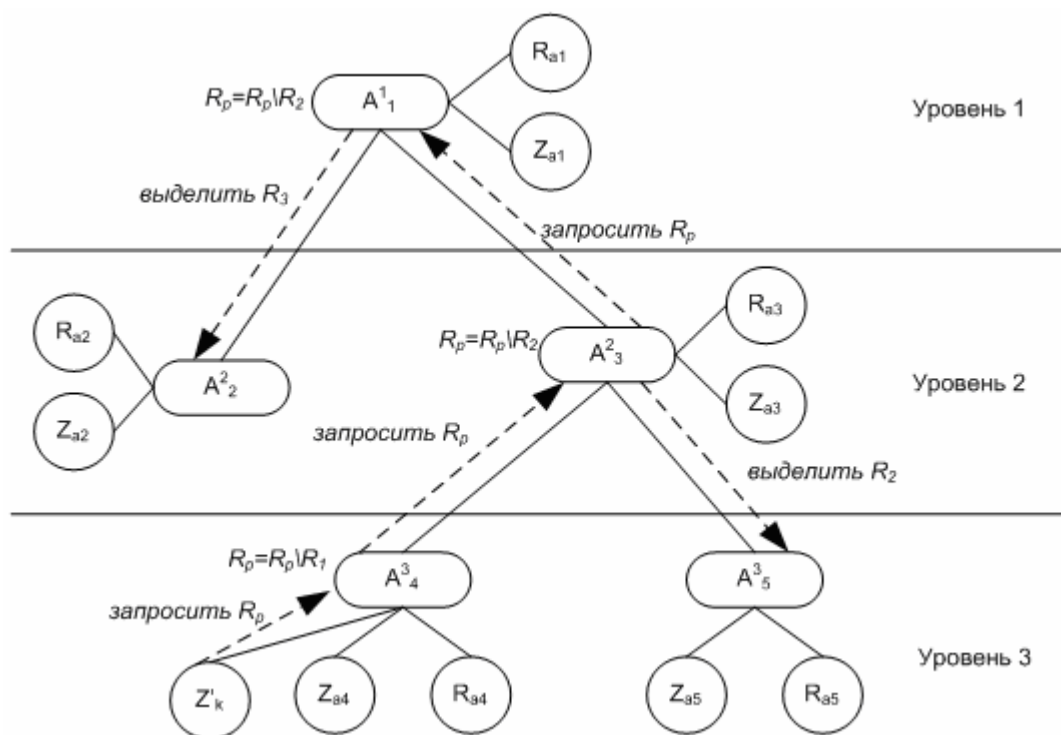


Рис. 2 Пример взаимодействия узлов управления в СУФ с трехуровневой иерархией

На рис. 2 изображен пример взаимодействия узлов управления в СУФ с трехуровневой иерархией. Задача z'_k требует множество ресурсов R_p , которое включает ресурсы R_1, R_2, R_3 , то есть $R_p = \{R_1, R_2, R_3\}$, однако ресурсы находятся в ведении агентов разных уровней иерархии $R_1 \in A^3_4, R_2 \in A^3_5, R_3 \in A^2_2$.

Вывод. Использование предложенной модели в системах управления функционированием информационно-телекоммуникационных систем позволяет осуществлять эффективное распределение и перераспределение общих ресурсов при возникновении новых задач и изменении значимостей бизнес-процессов. Предложенный алгоритм выделения ресурсов, учитывающий изменяющуюся значимость задач, может быть использован в иерархических системах управления.

This article offers the model of management by distribution of the limited resources of the corporate information-telecommunication system when the importance business-processes can change.

1. Теленик С.Ф., Ролік О.І., Букасов М.М., Соколовський Р.Л. Система управління інформаційно-телекомунікаційною системою корпоративної АСУ// Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. — К.: «ВЕК+», — 2006. — № 45.— С. 112—126.
2. Теленик С.Ф., Ролік О.І., Букасов М.М., Терещенко П.І. Управління доступом до обмежених ресурсів інформаційно-телекомунікаційної мережі АСУ спеціального призначення // Зб. наук. праць ЦНДІ ЗС України. — 2006. — № 3 (37). — С. 33—43.
3. Теленик С.Ф., Ролік О.І., Букасов М.М. Моделі управління розподілом обмежених ресурсів в інформаційно-телекомунікаційній мережі АСУ// Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка. — К.: Екотех, — 2006. — № 44. — С. 234—239.
4. Теленик С. Ф., Ролік О.І., Терещенко П.І., Літвінцов О.В. Модель управління розподілом ресурсів інформаційно-телекомунікаційної системи збройних сил України// Збірник науков. праць ОТ і ВБ України. — 2006. — №5 (34). — С. 117—124.
5. Гребешков А.Ю. Стандарты и технологии управления сетями связи. — М.: Эко-Тренз, 2003.— 228 с.
6. Дымарский Я.С. Управление сетями связи: принципы, протоколы, прикладные задачи / Я.С. Дымарский, Н.П. Крутякова, Г.Г. Яновский. — М.: ИТЦ «Мобильные коммуникации», 2003. — 384 с. — (Сер. «Связь и бизнес»).
7. Дубова Н. Управление услугами для бизнеса// Открытые системы. — 2005. — № 1.

ОПЕРАТИВНА НЕЙРОМЕРЕЖНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ
СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ КЕРУВАННЯ

Слань Ю. М., Трегуб В. Г.

Однією з фундаментальних в теорії систем автоматичного керування є задача ідентифікації технологічного об'єкта керування. Її метою є побудова ідентифікаційної моделі \hat{P} , що апроксимує об'єкт P (рис. 1) [1]:

$$\| \hat{y} - y \| = \| \hat{P}(u) - P(u) \| \leq \varepsilon, \quad u \in U \quad (1)$$

для деякого заданого $\varepsilon > 0$ і визначеної норми $\| \dots \|$.

В рівнянні (1) $\hat{y} = \hat{P}(u)$ — виходи ідентифікаційної моделі, U — допустима множина керувань. Причому, як для статичної, так і для динамічної систем оператор P неявно визначений парами сигналів вхід-вихід $\{u, y\}$.

Отже, задача полягає у побудові оптимальної відповідно до деякого критерію моделі за результатами спостережень за вхідними та вихідними змінними системи [2].

Вибір класу, до якого належить оператор \hat{P} , і самого оператора визначається множиною факторів, пов'язаних з бажаною точністю і аналітичним трактуванням моделі. До них відносяться адекватність представлення P з допомогою \hat{P} , складність ідентифікації, простота моделі, можливість її розширення та доповнення, а також можливість використання моделі в реальному масштабі часу. Вибір \hat{P} залежить і від наявної апріорної інформації про структуру об'єкта [1].

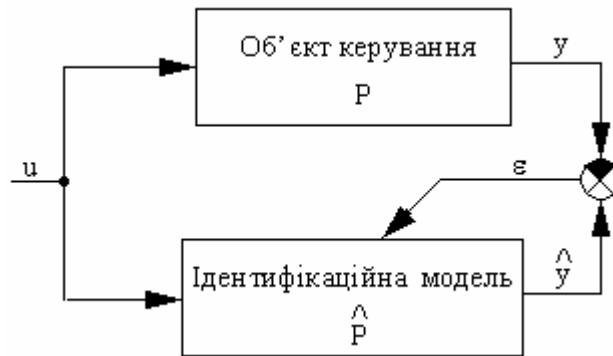


Рис. 1 Ідентифікація об'єкта керування

Завдяки своїм універсальним апроксимуючим властивостям штучні нейронні мережі (ШНМ) являють собою потужний інструмент для розв'язання задачі ідентифікації лінійних та нелінійних статичних та динамічних об'єктів керування, в тому числі стаціонарних або нестационарних. Побудовані на основі ШЕМ дискретні ідентифікаційні моделі називаються нейроемуляторами (НЕ) або предикторами. В загальному вигляді вони описуються наступним нелінійним рівнянням:

$$\hat{y}(k+1) = NN(y(k), y(k-1), \dots, y(k-l_1), u(k), u(k-1), \dots, u(k-l_2)), \quad (2)$$

де $NN(\dots)$ — перетворення вхід-вихід, що виконує ШНМ, l_1 — глибина затримки зворотного зв'язку по виходу НЕ, l_2 — глибина затримки по входу НЕ.

Структуру штучної нейронної мережі, описану рівнянням (2), показано на рис. 2.

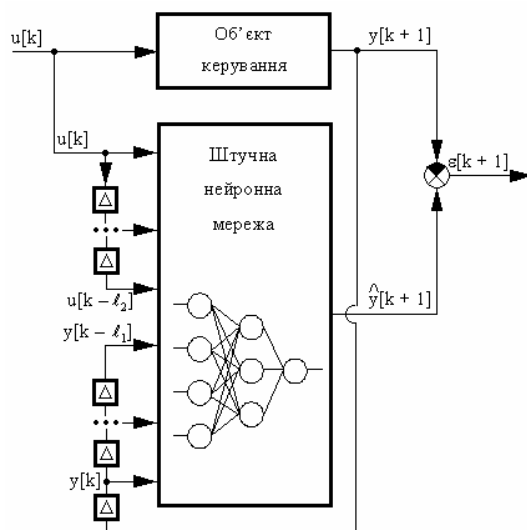


Рис. 2 Структура нейромережної ідентифікаційної моделі

Класично ідентифікація проводиться на основі визначених гіпотез і теоретичних досліджень за наявними експериментальними даними. При цьому особлива увага приділяється фізичному змісту отриманої моделі. Дійсно, отримана з допомогою ШНМ ідентифікаційна модель мало придатна для подальшого аналізу з метою з'ясувати сутність процесів що проходять всередині об'єкта. Це пов'язане з розподіленістю перетворення вхід-вихід, що проводиться нею за всіма нейронами мережі. Однак, відображення фізичної суті процесів і не є необхідною умовою ідентифікації, так як в адаптивній постановці задача полягає в оперативній побудові прогнозу поведінки об'єкта при визначеній стратегії управління.

У випадку необхідності ідентифікації системи в режимі реального часу, коли на кожному кроці синтезу сигналу керування необхідно мати адекватну модель реального об'єкту використовують так звані рекурентні методи оптимізації [2].

Особливості використання рекурентних алгоритмів при оптимізації параметрів нейронних мереж полягають на такому принципі, що на кожній ітерації використовується лише одна пара даних „вхід-вихід” $\{u, y\}$ з множини експериментальних даних:

$$\theta_i(u, y) = \theta_{i-1}(u, y) + \mu_i \cdot f_i, \quad (3)$$

де θ_i, θ_{i-1} на поточному та попередньому кроках характеризують набір параметрів, що підлягають налаштуванню; μ_i — крок пошуку; f_i — функція, що визначає напрям пошуку.

Більшість рекурентних алгоритмів [2 — 5] розроблені для оцінки досить простих лінійних моделей. У випадку, коли модельна структура містить велику кількість параметрів настройки, застосування рекурентних алгоритмів в режимі реального часу стає досить проблематичним. В даному випадку переналаштування параметрів мережі відбувається досить тривало і втрачаються її можливості ідентифікації об'єкта в реальному масштабі часу.

Одним з найпростіших методів реалізації рекурентних алгоритмів налаштування параметрів штучної нейронної мережі є рекурентний градієнтний метод. В теорії нейронних мереж цей метод отримав назву рекурентного методу зворотного поширення помилки. Для даного випадку величина f_i в рівнянні (3) визначається таким чином [6]:

$$f_i = \psi(i, \theta_{i-1}) \cdot \varepsilon(i, \theta_{i-1}), \quad (4)$$

де $\psi(i, \theta) = \frac{d \hat{y}(i|\theta)}{d\theta}$, $\varepsilon(i, \theta_{i-1})$ — різниця між сигналами на виході об'єкта та його нейромережної моделі.

В якості досліджуваного об'єкту використано послідовне з'єднання аперіодичної ланки першого порядку та ланки чистого запізнення. При цьому динамічні параметри об'єкта є нестационарними, що виражається зміною його коефіцієнту передачі та сталої часу в межах 0,5 – 1,5 (од. вим. у / од. вим. u) та 50 – 150 с відповідно (за нормальним законом розподілу); збурення, змінюється аналогічно в межах –20% . . . +20%. На об'єкті працює лінійний ПІ-регулятор, параметри якого налаштовано шляхом їх почергової зміни до досягнення мінімального значення дисперсії розузгодження:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - m_x)^2 . \quad (5)$$

Як нейромережний ідентифікатор дослідним шляхом обрано штучну нейронну мережу, що має чотири входи та складається з одного захованого шару з десятьма нейронами з логістичними функціями активації і вихідного шару з одним нейроном і лінійною функцією активації. Чотири входи мережі характеризують стан об'єкту на $i - 1$ та $i - 2$ кроках а також значення сигналу керування на поточному та попередньому кроках.

З використанням рекурентної процедури (3) – (4) за допомогою математичного пакету Matlab побудовано алгоритм оперативної нейромережної ідентифікації.

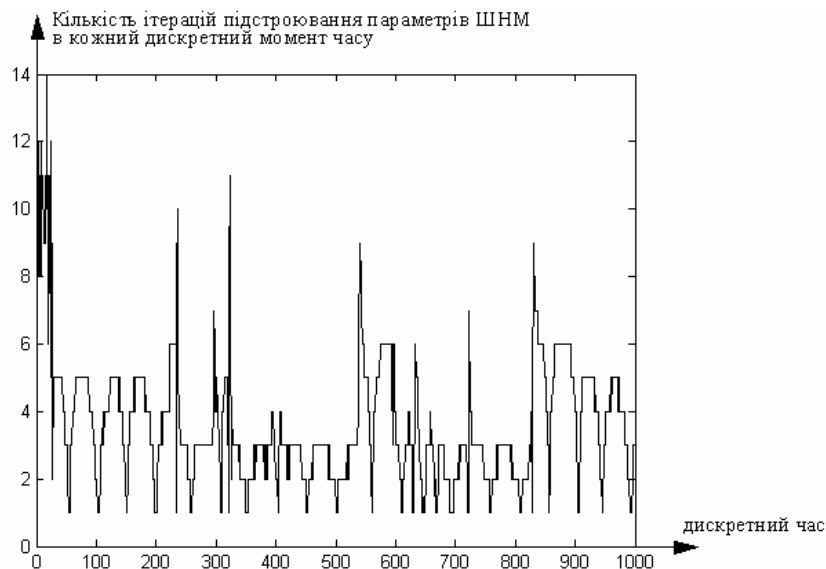


Рис. 3 Процедура оперативної нейромережної ідентифікації

На рис. 3 показано кількість ітерацій, що виконуються для підстроювання параметрів нейронної мережі, в кожний дискретний моменту часу роботи об'єкта. Ця процедура починає працювати кожного разу при зміні параметрів об'єкта керування і виникненні розузгодженості між виходом об'єкта та його оцінки на виході ідентифікатора. З малюнку видно, що на початкових кроках ідентифікації кількість ітерацій підстроювання може бути значно більша 0. Це пов'язане з тим, що потрібен деякий час для встановлення певної рівноваги між коефіцієнтами настройки нейронної мережі, тобто повинне відбутись попереднє її пристосування до об'єкту керування.

Результатом роботи процедури рекурентної ідентифікації є отримання адекватної оцінки вихідного параметру об'єкта. На рис. 4. суцільною лінією показано реалізацію випадкового процесу на виході об'єкта, а маркерами „*” показано сигнали на виході оперативного ідентифікатора через кожні 10 дискретних моментів часу. Основною вимогою застосування оперативного ідентифікатора є те, що при цьому динаміка нестационарності об'єкта керування повинна бути повільнішою за період переналаштування його параметрів.

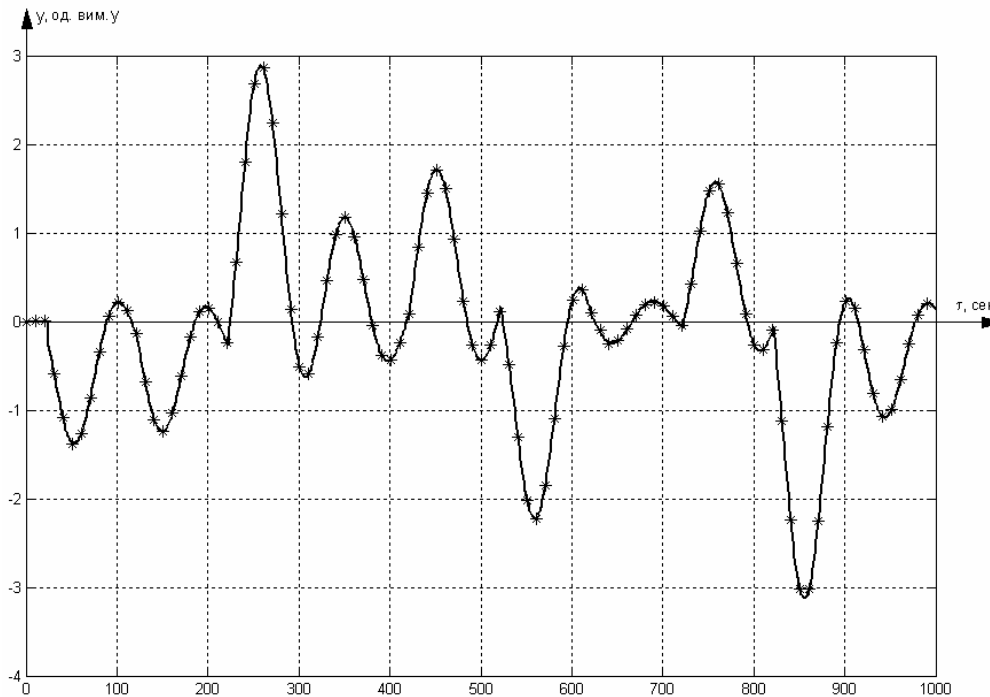


Рис. 4 Оперативна нейромережна ідентифікація нестационарного об'єкта керування

Висновки. Проведені дослідження з нейромережними алгоритмами оперативної ідентифікації показали:

- ✓ штучні нейронні мережі здатні давати адекватну оцінку параметрів стану об'єкта керування в реальному часі його роботи та оперативно відслідковувати їх зміни для прийняття відповідних рішень щодо розрахунку нових керуючих впливів;
- ✓ градієнтний рекурентний метод настроювання параметрів штучної нейронної мережі має досить високу швидкодію та не вимагає великих затрат оперативної пам'яті.

Article describes the results of the operative neural-network identification based on recurrent gradient method tuning of the artificial neural network parameters. This algorithm is the fastest and most elementary between the methods of this class. It requires the least expense of the operative memory.

1. Narendra K. S., Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural networks // IEEE Transactions on Neural Networks.— 1990.— Vol. 1.— No. 1.— p. 4 – 27.
2. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991.— 432 с.
3. Гроп Д. Методы идентификации систем: Пер. с англ.— М.: Мир, 1979.— 302 с.
4. Сейдж Э. П., Мелса Д. Л. Идентификация систем управления: Пер с англ.— М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974.— 248 с.
5. Цыпкин Я. З. Информационная теория идентификации.— М.: Наука, 1995.— 336 с.
6. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егупова.— М.: Изд.-во МГТУ им. Баумана, 2002.— 744 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАЙЕСОВСКИХ СЕТЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОИСКА МЕСТА И ТИПА ОТКАЗА СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Фефелов А. А.

Введение. Решение задачи обнаружения места и типа отказа технической системы, как правило, требует детального анализа самой системы или ее модели. Возникновение отказа приводит к невозможности выполнения системой или ее отдельным компонентом своих функций. Отказы могут происходить под воздействием внешних факторов или внутренних процессов, протекающих в системе. С точки зрения наблюдателя, в качестве которого может выступать диагностирующая система, существует, по крайней мере, три источника информации, позволяющие сделать вывод о типе и месте возникшего в системе отказа. Они представлены в виде схемы на рисунке 1.

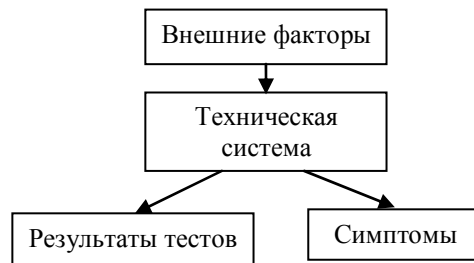


Рис. 1 Взаимосвязь информационных источников в диагностике отказов

Внешние факторы (например, температура среды, влажность, запыленность и т.д.) в основном оказывают отрицательное влияние на техническую систему. Эти факторы можно контролировать (измерять) непрерывно, но ими нельзя управлять. Различные диагностируемые узлы технического объекта демонстрируют различную восприимчивость к внешним воздействиям, что позволяет при наблюдении того или иного внешнего фактора, делать вывод о вероятном отказе.

Первичная информация об отказах технической системы проявляется в виде симптомов или, нежелательных отклонений контролируемых параметров. Как правило, эта информация доступна в любой момент времени без привлечения каких-либо активных действий со стороны операторов или другого технического персонала объекта. Однако, из-за структурной сложности технической системы, симптомы не дают однозначного ответа на вопрос о присутствующем отказе. Они лишь позволяют несколько сузить границы будущих поисков.

Окончательный диагноз возможен только при использовании третьего источника информации – процедур тестирования компонентов технической системы. Как правило, при проектировании любого технического объекта учитывается возможность проведения проверок его отдельных компонентов на предмет наличия в них разного рода дефектов. При этом подразумевается, что всегда существует последовательность тестов, из множества допустимых тестов, при помощи которой можно определить любой отказ, возникающий в любом месте технической системы.

Поиск отказа, однако, осложняется возможностью взаимного влияния компонентов системы друг на друга (имеется в виду ситуация, когда отказ одного компонента влечет за собой выход из строя другого) и возможностью получения противоречивой информации вследствие неточности измерений или ошибок тестирования.

Таким образом, можно сказать, что, решая задачу определения места и типа отказа в системе, чаще всего приходится пользоваться косвенной информацией, которая не дает стопроцентной уверенности в диагнозе. Поэтому оснащение системы диагностики senso-

рами, способными воспринимать максимум доступной информации и алгоритмами, способными к ее оптимальной обработке, является залогом получения качественных и правдивых результатов.

На сегодняшний день одной из наиболее подходящих моделей, предназначенных для работы с неполной, неточной и противоречивой информацией, являются байесовские сети доверия. Математический аппарат байесовских сетей основан на вероятностном подходе и способен в максимальной степени использовать информацию, поступающую из трех выделенных источников для достижения максимального эффекта.

Постановка задачи. Как было сказано выше, наиболее содержательным источником информации при диагностике является совокупность процедур тестирования компонентов технической системы. Основными недостатками рассматриваемого источника являются его ресурсоемкость и непостоянная доступность. Ресурсоемкость проявляется в затратах времени и средств на проведение процедур тестирования, что в свою очередь ставит задачу выбора оптимальной последовательности тестов. Доступность (возможность проведения) тестов может быть ограничена условиями и режимом эксплуатации объекта.

Таким образом, задачей данного исследования является разработка метода выбора оптимальной последовательности процедур тестирования, обеспечивающей минимальные затраты ресурсов на поиск места и типа отказа технической системы с получением максимально достоверного ответа при условии использования в качестве модели диагностируемого объекта математического аппарата байесовских сетей.

Байесовские сети в решении задач технической диагностики. Байесовские сети доверия (БСД) – один из наиболее широко распространенных методов представления знаний с неопределенностью [1, 2, 3]. В общем виде БСД это направленный граф, не содержащий направленных циклов. Граф состоит из узлов и дуг, которые соединяют эти узлы (рис. 2). Узлы представляют собой случайные переменные, которые могут быть дискретными или непрерывными. Дуги отображают причинно-следственные связи между переменными, благодаря чему БСД еще иногда называют причинно-следственными сетями. В причинно-следственных сетях родительские вершины представляют собой причины, а дочерние – следствия. Например, заряд аккумулятора влияет на возможность освещения салона автомобиля и работу системы зажигания. Данные зависимости моделируются при помощи соответствующих дуг.

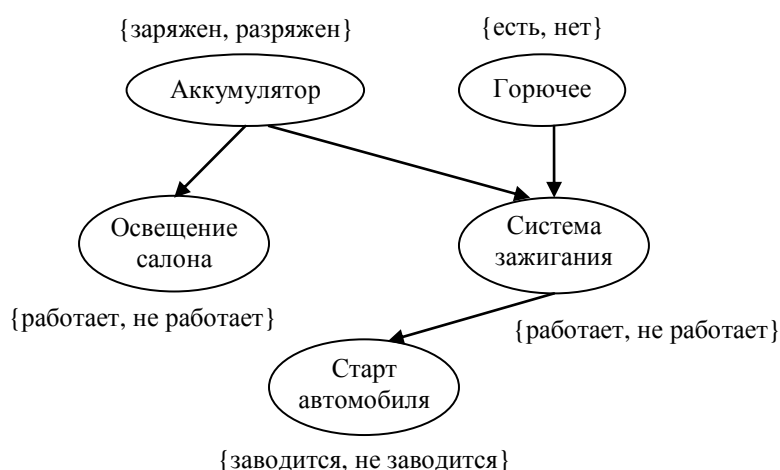


Рис. 2 Пример байесовской сети анализа технической системы

Каждой переменной сети ставится в соответствие таблица условных вероятностей, в которой перечислены вероятности всех возможных значений этой переменной при условии принятия тех или иных значений ее родителей. Например, для переменной «Освещение салона» таблица условных вероятностей может выглядеть следующим образом (рис. 3):

$$P(\text{Освещение салона} = \text{"работает"} \mid \text{Аккумулятор} = \text{"заряжен"}) = 0.97$$

$$P(\text{Освещение салона} = \text{"работает"} \mid \text{Аккумулятор} = \text{"разряжен"}) = 0.05$$

Рис. 3 Пример таблицы условных вероятностей для переменной «Освещение салона»

Формально БСД может быть представлена следующим образом:

$$BNN = \langle U, T \rangle, \tag{1}$$

где $U = \{H_1, \dots, H_n\}$ - конечное упорядоченное множество случайных переменных (узлов сети) такое, что для любого $H_i \in U, i = \overline{1, n}$ выполняется следующее условие:

$$\exists P_i \subseteq \{H_1, \dots, H_{i-1}\} \mid P(H_i \mid H_1, \dots, H_{i-1}) = P(H_i \mid P_i). \tag{2}$$

Это условие определяет направление связей между узлами сети, реализуя свойство условной независимости переменных. Каждая переменная принимает значения из конечного множества значений, т.е. $H_i = \{h_{i1}, \dots, h_{ir_i}\}$, при этом $\sum_{j=1}^{r_i} P(h_{ij}) = 1$.

$T = \{P(H_1 \mid P_1), \dots, P(H_n \mid P_n)\}$ - множество таблиц условных вероятностей каждой переменной-потомка H_i с переменными-предками P_i . Если переменная H_i не имеет предков, то используются безусловные вероятности $P(H_i)$.

Основное назначение БСД – это получение информации о недоступных для наблюдения переменных посредством информации, приходящей в наблюдаемые переменные и связей между ними.

Основное преимущество байесовских сетей при решении задач диагностики технического состояния состоит в их способности одновременно выполнять как предсказательные, так и классифицирующие функции. Информация, распространяющаяся по направлению связей в БСД, обладает предсказательной способностью, т.к. позволяет делать выводы о возможных последствиях каких-либо изменений в работе отдельных подсистем. С другой стороны, обратный поток информации позволяет выявить (классифицировать) причины уже появившихся (наблюдаемых) симптомов. Концептуальная модель диагностируемой системы в контексте байесовских сетей может быть представлена следующим образом (рис. 4).

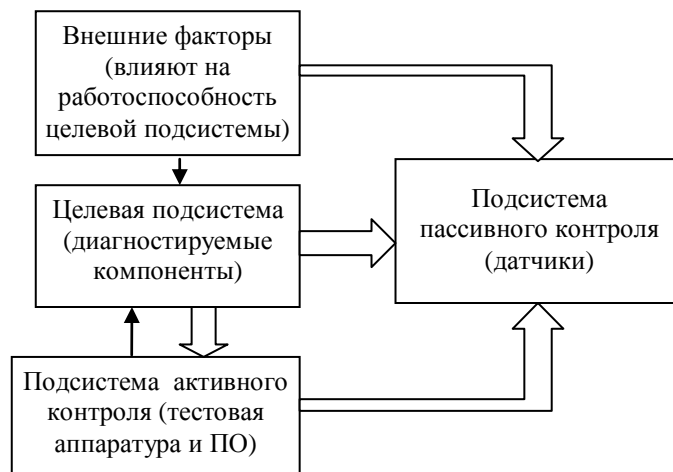


Рис. 4 Концептуальная модель диагностируемого объекта (тонкими стрелками показаны направления воздействий, влияющие на результат диагностики; широкими стрелками показаны направления распространения информации, необходимой для диагностики).

Целевая подсистема состоит из набора компонентов с возможными отказами и неисправностями. Отказы целевой подсистемы могут быть выражены в виде симптомов, которые фиксируются датчиками, осуществляющими оперативный (непрерывный) контроль, и в виде результатов тестирования, проводящегося путем периодического активно-

го воздействия на целевую подсистему. При этом тестирование, как правило, требует определенных затрат времени, которое зачастую является ограниченным ресурсом. Кроме того, различные тесты обладают разной степенью информативности, что необходимо учитывать в процессе диагностирования. Так как реальные системы не бывают замкнутыми, необходимо учитывать наличие внешних факторов (факторов риска), которые, воздействуя на целевую подсистему, могут оказывать существенное влияние на результаты диагностики. К внешним факторам можно отнести не только пагубное воздействие окружающей среды, но и положительное влияние капитального и других видов ремонта, проведение мероприятий по техническому осмотру оборудования, модернизации и т.д.

Таким образом, в контексте задачи диагностики, все множество узлов байесовской сети можно разбить на четыре основные категории:

$$U = T \cup P \cup A \cup R, \quad (3)$$

где T - множество целевых узлов; P - множество узлов пассивного контроля; A - множество узлов активного контроля; R - множество узлов, представляющих внешние факторы. Целевые узлы представляют диагностируемые компоненты системы, которые могут находиться в одном из двух состояний – работоспособном или неработоспособном. Как правило, неработоспособное состояние принимается в качестве целевого.

Узлы пассивного контроля представлены датчиками (например, давления или температуры), информация о состоянии которых может быть получена в любой момент времени и без каких-либо дополнительных затрат. В качестве датчиков могут использоваться органы чувств человека (зрение, слух). Информация, поступающая от датчиков, может быть дискретной или непрерывной. Дискретная информация – это, как правило, наблюдения, выраженные в качественной форме (например, цвет выхлопных газов, наличие стуков в цилиндре или в картере двигателя и т.д.). Источниками такой информации преимущественно являются люди (эксперты), вследствие чего ее можно рассматривать как субъективную.

Физическими эквивалентами узлов активного контроля являются тестирующее оборудование (встроенные электронные тестирующие модули, тестирующее ПО и т.д.), а также эксперты, в задачи которых входит обслуживание технического объекта и поддержание его работоспособности. Узлы активного контроля обладают характеристиками, свойственными узлам пассивного контроля, но для получения информации требуют дополнительных затрат ресурсов определенного типа. Критическим ресурсом для задач диагностики является время. Введение ограничения на использование ресурсов приводит к необходимости упорядочивания процедур тестирования посредством ранжирования узлов активного контроля. Кроме того, каждый тест, независимо от его исхода, изменяет вероятностное распределение состояний целевых узлов, т.е. обладает информативностью.

Метод выбора оптимальной последовательности процедур тестирования. Показатель эффективности каждого теста $a \in A$ относительно целевого узла $t \in T$ может быть задан в виде следующей весовой функции:

$$w_a^t = f(I_a^t, C_a), \quad (4)$$

где w_a^t - показатель эффективности теста a относительно целевого узла t ; I_a^t - информативность теста a относительно целевого узла t ; C_a - ресурсоемкость (значение стоимости) теста a ;

Информативность теста можно выразить как изменение энтропии Шеннона [4, 5] для целевого узла в результате проведения теста и получения наблюдений:

$$I_a^t = \sum_j P(a_j) \sum_i P(t_i | a_j) \cdot \log P(t_i | a_j) - \sum_j P(a_j) \sum_i P(t_i | a_j) \cdot \log P(t_i), \quad (5)$$

где $P(a_j)$ – априорная вероятность исхода a_j теста a до его проведения; $P(t_i | a_j)$ – апостериорная вероятность состояния t_i целевого узла t , если проведенный тест a показал ре-

зультат a_j ; $P(t_i)$ – априорная вероятность состояния t_i целевого узла до проведения теста. В качестве примечания необходимо отметить, что в данном случае не делается разграничений между узлами БСД (например, t и a) и соответствующими им дискретными случайными переменными (например, H_k и H_l). Таким образом, переход узла в одно из состояний, а также тот или иной исход теста есть не что иное, как присвоение соответствующей переменной конкретного значения из числа возможных значений.

Учитывая наличие максимального ресурса C_{\max} , для расчета показателя эффективности теста предложена следующая формула:

$$w_a^t = \frac{I_a^t}{\sum_{j=1}^{N_A} I_j^t} - \mu \cdot \frac{C_a}{C_{\max}}, \quad (6)$$

где $C_{\max} \neq 0$, $\sum_{j=1}^{N_A} I_j^t \neq 0$; N_A – количество узлов активного контроля в системе; μ – информативно-стоимостной коэффициент, определяющий весовое соотношение между информативностью теста и его стоимостью. Значение коэффициента μ подбирается экспертным путем.

Показатель w_a^t является относительной величиной, определяющей вес данного теста по отношению к другим тестам из множества A . Если, например, $\mu = 1$ и $C_a > C_{\max}$, то $w_a^t < 0$ что можно интерпретировать как бессмысленность проведения теста a для целевого узла t .

Одним из подходов построения последовательности проводимых тестов является ранжирование целевых узлов в направлении убывания вероятностей их целевого состояния (т.е. состояния отказа). В этом случае диагностирование начинают с того узла, чья вероятность отказа является максимальной. Выбрав таковой, проводят упорядочивание тестов, согласно значениям показателей w_a^t . Тесты с большим весом выполняют в первую очередь, т.к. они являются оптимальными в соотношении цена-информативность для диагностируемого целевого узла.

На основании сказанного выше, построим обобщенный алгоритм поиска отказа технической системы.

Шаг 1. Получение информации о внешних факторах и симптомах от датчиков (установка значений соответствующих узлов байесовской сети).

Шаг 2. Обновление вероятностей отказа компонентов системы (осуществление логического вывода из байесовской сети) в соответствии с поступившей информацией.

Шаг 3. Выбор компонента технической системы с максимальной вероятностью отказа.

Шаг 4. Вычисление информативности каждого теста по отношению к выбранному компоненту по формуле (5).

Шаг 5. Останов, если $\forall a, I_a^t < I_{\min}^t$.

Шаг 6. Вычисление информативно-стоимостного показателя (веса теста) по формуле (6).

Шаг 7. Сортировка тестов на основании значений весов (в направлении убывания весов).

Шаг 8. Выполнение теста с максимальным весом.

Шаг 9. Возврат к шагу 2.

По окончании работы алгоритма выводится информация о распределении вероятностей отказа отдельных компонентов технической системы, на основании которой принимается окончательное решение о наличии дефектов.

Пример решения задачи поиска отказа технической системы. В качестве эксперимента приведем простой пример поиска отказа технической системы, модель которой в виде байесовской сети представлена на рисунке 5.

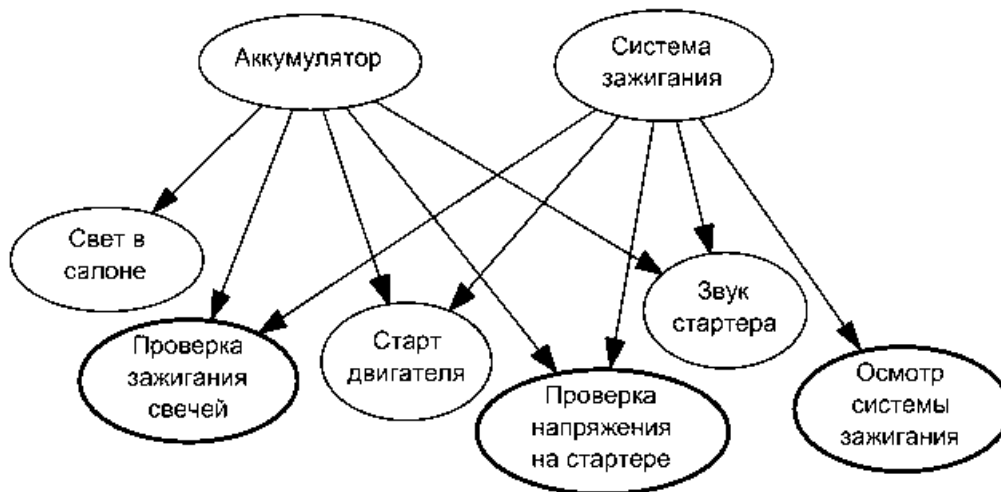


Рис. 5 Байесовская сеть диагностики транспортного средства

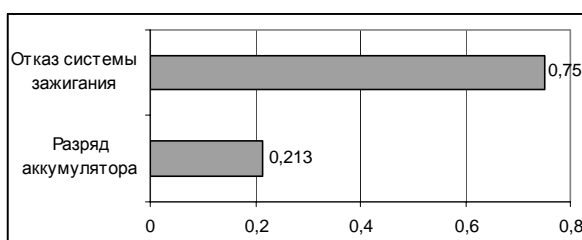
В этой модели два корневых узла представляют множество T диагностируемых компонентов системы. Узлы, представленные овалами с утолщенным контуром – множество узлов активного контроля, а остальные являются узлами пассивного контроля или симптомами. Для упрощения примем $\mu = 0$ и $I_{\min} = 0.1$.

Поиск отказа начинается с поступления в сеть информации о симптомах. Пусть на момент начала диагностики известно следующее (табл. 1). После обновления информации и вычисления значений информативности тестов, получаем следующие результаты (рис. б).

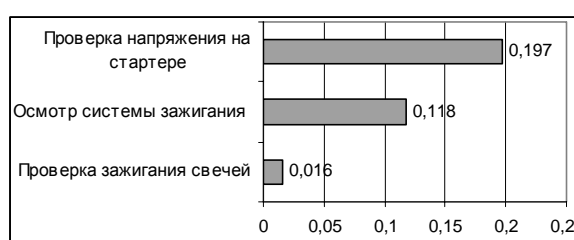
Таблица 1.

Текущие наблюдения и результаты тестов

Наблюдение (тест)	Значение
Старт двигателя	Не стартует
Свет в салоне	Есть
Звук стартера	Нет



а



б

Рис. б а - распределение вероятностей отказа целевых узлов в соответствии с поступившей информацией; б - выработанная системой диагностики последовательность тестов с указанием их информативностей

Так как в списке присутствуют тесты, чья информативность больше I_{\min} , то выбираем и выполняем наиболее информативный тест. Допустим, проверка напряжения на стартере завершилась удачно. Теперь у нас есть следующие наблюдения (табл. 2).

Таблица 2.

Текущие наблюдения и результаты тестов

Наблюдение (тест)	Значение
Старт двигателя	Не стартует
Свет в салоне	Есть
Звук стартера	Нет
Проверка напряжения на стартере	Норма

Далее, в соответствии с алгоритмом поиска отказа, повторно производим обновление информации и вычисление значений информативности тестов (рис. 7).

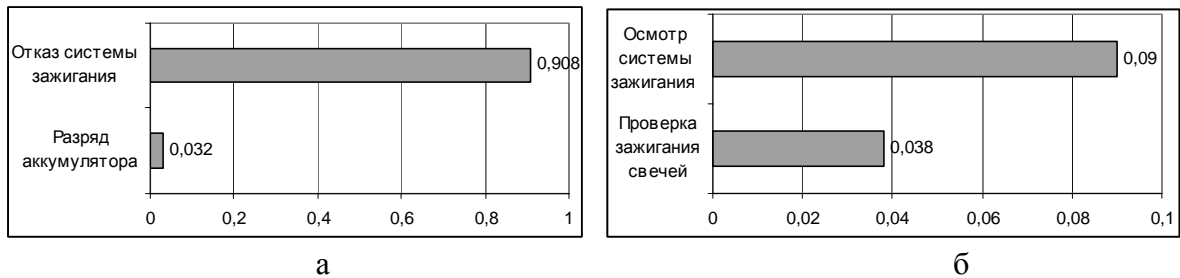


Рис. 7 а - распределение вероятностей отказа целевых узлов после проведения теста; б - выработанная системой диагностики новая последовательность тестов

В данном случае в списке нет достаточно информативных тестов. Действительно, любые результаты оставшихся двух тестов уже не смогут существенно повлиять на распределение вероятностей целевых узлов байесовской сети. Поэтому, после второго шага алгоритма дальнейшее тестирование прекращается, а по полученному распределению делается заключение об отказе системы зажигания.

Выводы. Разработан метод и алгоритм оптимального поиска места и типа отказа сложной технической системы, основанный на использовании информативно-стоимостного показателя процедур тестирования и позволяющий в значительной степени уменьшить затраты времени и других типов ресурсов на проведение проверок. Экспериментальные исследования подтверждают эффективность данного метода, который в совокупности с применяемым аппаратом байесовских сетей может быть реализован в качестве отдельного компонента комплексной системы технического диагностирования.

The paper deals with the approach to the decision of one of the problems of the technical diagnostics, based on use of the Bayesian networks. This approach includes the development of structure of diagnosing Bayesian network and a method of construction the optimum sequence of testing procedures of components of complex technical system. For acknowledgement of efficiency of a method test experiments are lead.

1. Бидюк П.И. Терентьев А.Н., Гасанов А.С. Построение и методы обучения байесовских сетей// Кибернетика и системный анализ. – 2005. №4.– с.133-147.
2. Heckerman D. A tutorial on learning with Bayesian Networks. - Microsoft Tech. Rep. – MSR-TR-95-6, 1995.
3. Jensen F. V. Bayesian networks basics. - Tech. Rep. Aalborg Univ., Denmark, 1996.
4. Бідюк П. І., Литвиненко В. І., Кроптя А. В., Фефелов А. О. Розповсюдження невизначеності в мережі Байєса. // Збірник наукових праць у п'яти томах другої міжнародної наукової конференції Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій / Євпаторія 2007, Том 3, с.21-26.
5. Balaram Das. Representing uncertainties using Bayesian Networks. // DSTO-TR-0918. DSTO Electronics and Surveillance Research Laboratory, Australia 2000.

К ВОПРОСУ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРОЖИДКОСТНОГО ФРОНТА В ДЕФЛЕГМАТОРЕ АБСОРБЦИОННО-ДИФфуЗИОННОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ (АДХМ)

Хобин В.А., Титлова О.А.

1. Традиционным и наиболее широко распространенным источником производства холода являются компрессорные холодильные машины (КХМ). Их существенные недостатки: а) применение озоноразрушающих хладагентов, который используют 85% КХМ Украины; б) безальтернативный источник энергии – переменное напряжение промышленной частоты с ГОСТированными характеристиками; в) низкий ресурс работы компрессора КХМ в условиях нестабильных характеристик питающего напряжения, его высокая стоимость и необходимость замены при ремонте.

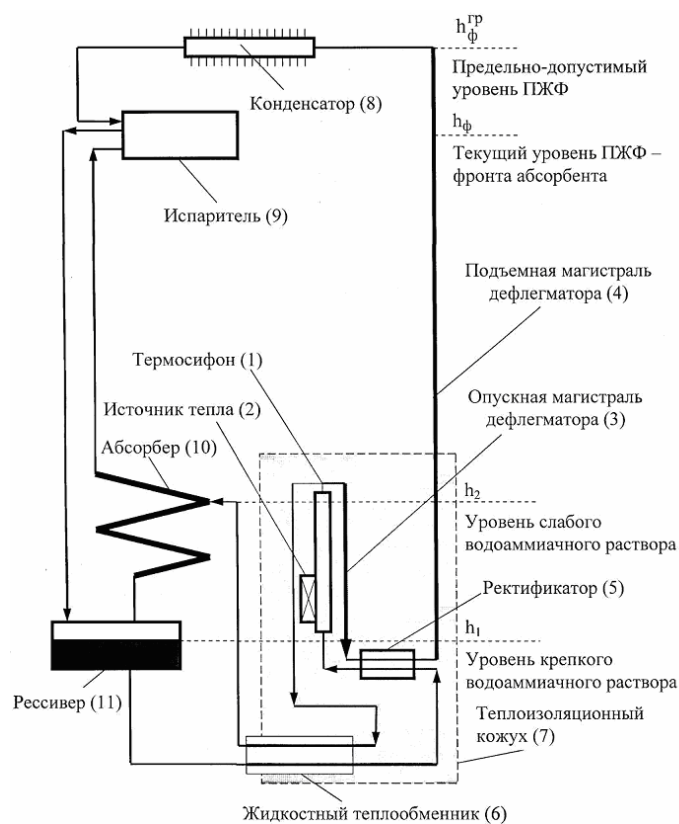


Рис. 1 Схема АДХМ

Альтернативой КХМ являются абсорбционно-диффузионные холодильные машины (АДХМ). Их рабочее тело – водоаммиачный раствор (ВАР), давление которого создается инертным газом, экологически безопасен. Отсутствие компрессора повышает ресурс и надежность его работы, делает работу АДХМ бесшумной. Весьма важно, что источниками тепловой энергии АДХМ могут являться как электрическая энергия, в том числе, низкого качества, например, генерируемая простейшими ветро- и гидроэнергетическими установками, электроэнергия бортовой сети автомобилей, так и неэлектрические источники – природный газ, биогаз, дизельное топливо и т.д. [1].

Недостатком АДХМ является больший удельный расход энергии по сравнению с КХМ. Снижение этого показателя является актуальной задачей. Этому посвящены большое количество работ, связанных с совершенствованием конструкции АДХМ, оптимизации выбора его рабочего тела, давления заправки, режимов работы и, в последнее время, -

разработке эффективных систем автоматического управления (САУ) этими режимами [2, 3].

2. АДХМ (ее схема представлена на рис. 1) включает в себя: перекачивающий термосифон 1, источник тепла 2, дефлегматор с опускной 3 и подъемной 4 ветвями, горизонтальный ректификатор 5, жидкостный теплообменник (ЖТО) 6, теплоизоляционный кожух 7, конденсатор 8, испаритель 9, абсорбер 10, ресивер крепкого ВАР 11 [4]. Сущность ее работы (с акцентом на рассматриваемую здесь проблему) можно отразить следующими фазами.

Генерация парообразного аммиака из крепкого ВАР. При подводе достаточного количества тепла к нижней части термосифона, аммиак, находящийся в крепком ВАР, закипает. Образующиеся пузырьки включают пары аммиака (преимущественно) и воды. Пузырьки, обладая подъемной силой, поднимаются в верхнюю часть термосифона, обедняя аммиаком ВАР и увлекая за собой частицы его жидкой фазы. С течением времени по всей высоте термосифона до уровня h_2 формируется парожидкостный столб, состоящий из пузырьков пара и частиц жидкости. В верхней части термосифона, выше уровня h_2 , жидкость отделяется от пара, ее избыток сливается в верхнюю часть абсорбера, а пар поступает в опускной участок дефлегматора.

Очистка парообразного аммиака от паров воды. Ее сущность состоит в охлаждение движущихся по дефлегматору паров аммиака и воды с целью конденсации последних за счет более низкой температуры конденсации аммиака. Охлаждение идет последовательно, начиная с опускного участка дефлегматора - за счет отвода тепла через его стенку, в ректификаторе - за счет отвода тепла к крепкому ВАР, в подъемном участке дефлегматора - за счет отвода тепла через его стенку (с различной интенсивностью, в зависимости от наличия вокруг нее и эффективности теплоизоляции).

Конденсат воды стекает в ректификатор. Парожидкостной фронт (ПЖФ) определяет границу раздела смеси паров и паров чистого аммиака. Высота подъема ПЖФ будет пропорциональна расходу энергии, подводимой к термосифону.

Производство холода. В конденсаторе, за счет потерь тепла через его ребренную стенку, температура паров аммиака дополнительно снижается, и они переходят в жидкое состояние. Жидкий аммиак стекает в испаритель, где находится парогазовая водородоаммиачная смесь (ПГС), содержащая преимущественно водород. При контакте происходит интенсивное испарение жидкого аммиака в ПГС при низком парциальном давлении и соответственно при низкой температуре (от -35 °С до -15 °С). В результате этого происходит охлаждение поверхности испарителя и связанных с ним холодильных камер.

Энергетическая эффективность АДХМ зависит от многих факторов. Рассмотрим тот из них, который обуславливает актуальность сформулированной задачи и связан с работой подъемного участка дефлегматора. В нем должна быть завершена очистка паров аммиака от воды. Это означает, что уровень ПЖФ должен находиться в пределах этого участка, не превышая его максимальную высоту h_{ϕ}^{rp} .

В условиях интенсивного подвода тепла к термосифону, прежде всего в режимах выхода АДХМ с холостого хода на рабочую нагрузку, и/или высокой температуре окружающей среды, когда эффективность работы дефлегматора снижается, уровень ПЖФ может превышать h_{ϕ}^{rp} . При этом пары воды будут попадать в конденсатор и далее в испаритель. Это приведет к росту температуры испарения и нарушит заданный режим работы АДХМ. Такая ситуация требует дополнительной генерации пара и, следовательно, существенно снижает энергетическую эффективность АДХМ.

В условиях слабого подвода тепла к термосифону, прежде всего в режимах длительного хранения продуктов при редких открываниях двери, и/или низкой температуре окружающей среды, когда эффективность работы дефлегматора повышается, уровень ПЖФ будет значительно ниже h_{ϕ}^{rp} . В этом случае пары аммиака будут переохлаждаться,

что приведет к их частичной конденсации в дефлегматоре, уменьшению подачи в конденсатор и испаритель. Это также снизит энергетическую эффективность АДХМ.

3. Максимум энергетической эффективности АДХМ по этому фактору достигается, когда уровень ПЖФ максимально близко приближается к $h_{\phi}^{гр}$, но не превышает этого уровня. Именно это обстоятельство обусловило разработку для АДХМ систем гарантирующего управления (СГУ), которые призваны обеспечить их работу именно в таких режимах [2]. Реализация СГУ АДХМ или других систем управления, обеспечивающих высокую энергетическую эффективность эксплуатации холодильных машин, требует получения в реальном времени достоверной информации о текущем значении уровня ПЖФ. Однако прямое измерение этого уровня (за счет введения внутрь дефлегматора каких-либо технических средств измерения) по понятным причинам невозможно.

Наиболее простые технические решения этой задачи связаны с измерением температур внешней поверхности дефлегматора. В частности, было бы возможно за счет специальной распределенной конструкции чувствительного элемента определить среднее значение температуры $\theta_{пд}^{ср}$ по всей высоте дефлегматора и, дополнительно измерив температуры $\theta_{пд}^{кв}$ и $\theta_{пд}^{ка}$ его поверхности в точках расположенных заведомо ниже и выше ПЖФ, соответствующих температурам конденсации паров воды (принимаяем $\theta^{кв} = 120^{\circ}C$) и аммиака (принимаяем $\theta^{ка} = 50^{\circ}C$), вычислить текущее значение уровня ПЖФ:

$$h_{\phi} = \frac{\theta_{пд}^{ср} - \theta_{пд}^{ка}}{\theta_{пд}^{кв} - \theta_{пд}^{ка}} h_{\phi}^{гр}, \text{ где } \theta_{пд}^{ср} = \frac{1}{h_{\phi}^{гр}} \int_0^{h_{\phi}^{гр}} \theta_{пд}(h) dh. \quad (1)$$

Погрешности такого метода измерения связаны с двумя основными факторами: а) с перетоками тепла вдоль корпуса дефлегматора в окрестности ПЖФ и, как следствие, несоответствию максимального градиента теплового поля расположению ПЖФ; б) инерционностью дефлегматора как среды распространения тепла и, как следствие, отставанию по фазе температур наружной поверхности дефлегматора от температур парожидкостной среды внутри него. Оценить величину этих погрешностей экспериментальным путем невозможно.

4. Альтернативой экспериментальным методам оценки указанных погрешностей являются методы на основе математических моделей. Дефлегматор, как тепловой объект, относится к классу объектов с распределенными параметрами. Его модель, в общем виде, определяется уравнением теплопроводности в частных производных [5]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_d c_d \theta_{пд}) = \frac{\partial}{\partial h} (\lambda_d \frac{\partial \theta_{пд}}{\partial h}) + Q(h), \quad (2)$$

где ρ_d, c_d, λ_d - плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности конструкционного материала дефлегматора; $Q(h)$ - плотность тепловых источников по высоте подъемной части дефлегматора; t - время.

Аналитический путь решения (2) достаточно сложен, особенно для случая, когда источник тепла, подводимого к стенке дефлегматора, перемещается. Кроме того, целесообразно исходно разрабатывать такую модель, которую впоследствии можно было бы непосредственно использовать при моделировании САУ АДХМ. Поэтому математическая модель динамики температурного поля на поверхности дефлегматора строилась в виде ячеистой модели. При этом дефлегматор рассматривался состоящим из набора ячеек малой длины с сосредоточенными параметрами, получающих тепло от парожидкостной смеси, обменивающихся им между собой и рассеивающих его в окружающую среду. В этом случае температура $\theta_{пд i}(t)$ каждой i -ой ячейки будет определяться их начальными значе-

ниями $\theta_{\text{пд}i}(t=0)$, суммарным тепловым потоком к ней $\Delta Q_i = Q_{1i} + Q_{2i} + Q_{3i}$ и временем t от момента изменения $\Delta Q_i(t)$:

$$\theta_{\text{пд}i}(t) = \theta_{\text{пд}i}(t=0) + \frac{1}{m_{\text{д}i} c_{\text{д}i}} \int_0^t \Delta Q_i(t) dt, \quad (3)$$

где $Q_{1i} = \alpha_i S_{\text{вн}} (\theta_{\text{см}} - \theta_{\text{пд}i})$ - тепловой поток от паровой водоаммиачной смеси к стенке дефлегматора при конденсации;

$Q_{2i} = -k_i (\theta_{\text{пд}i} - \theta_{\text{ос}}) \Delta h$ - тепловой поток в окружающую среду от стенки дефлегматора;

$Q_{3i} = \frac{\lambda}{\Delta h} F_c (\theta_{\text{пд}(i-1)} - 2\theta_{\text{пд}i} + \theta_{\text{пд}(i+1)})$ - тепловой поток вдоль корпуса дефлегматора (аксиальный);

$k_i = \alpha_{\Sigma i} \cdot \pi \cdot d_n$ - линейный коэффициент теплопередачи на i -ом участке от стенки к наружному воздуху, где:

$$\alpha_{\Sigma i} = \alpha_{\text{кон}i} + \alpha_{\text{луч}i} = [1.67 + 3.6 \cdot 10^{-3} \cdot (\frac{\theta_{\text{пд}i} + \theta_{\text{ос}}}{2}) \cdot (\theta_{\text{пд}i} - \theta_{\text{ос}})^{\frac{1}{3}}] + 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 0.92 \cdot (\frac{(273 + \theta_{\text{пд}i})^4 - (273 + \theta_{\text{ос}})^4}{\theta_{\text{пд}i} - \theta_{\text{ос}}}).$$

Для расчета коэффициента конвективного теплообмена $\alpha_{\text{кон}i}$ использовалась справочная обобщающая эмпирическая формула [6], а для расчета коэффициента лучистого теплообмена $\alpha_{\text{луч}i}$ - формула Стефана-Больцмана [5], в которой: 0.92 – степень черноты материала поверхности трубы; $5.67 \cdot 10^{-8}$ - постоянная Стефана – Больцмана.

$$F_c = \frac{\pi}{4} (d_n^2 - d_{\text{вн}}^2) - \text{площадь сечения корпуса (трубы) дефлегматора};$$

$$S_{\text{вн}} = \pi d_{\text{вн}} \Delta h - \text{площадь внутренней поверхности трубы дефлегматора};$$

$$\alpha_i = a \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \cdot g \cdot (\rho' - \rho'') \cdot 10^6}{\Delta h \cdot (\theta_{\text{см}} - \theta_{\text{пд}i}) \cdot \nu}} - \text{коэффициент теплоотдачи при конденсации на } i\text{-ом}$$

участке [5];

a – константа, характеризующая ориентацию трубы в пространстве, в данном случае, для вертикальной трубы;

$$\theta_{\text{пд}i}(t=0) - \text{начальное значение температуры } i\text{-ой ячейки};$$

$$m_{\text{д}i}, c_{\text{д}i} - \text{масса и теплоемкость } i\text{-ой ячейки стенки дефлегматора};$$

g - тепло парообразования водоаммиачной смеси; g - ускорение свободного падения;

ρ', ρ'', ν - соответственно плотность жидкости, плотность и коэффициент кинематической вязкости водоаммиачного пара;

$\Delta h = h/n$, где h , n , Δh - соответственно высота, число и шаг разбиения дефлегматора при переходе к ячеистой модели;

$$d_{\text{вн}}, d_n - \text{соответственно внутренний и наружный диаметры трубы дефлегматора};$$

$\theta_{\text{пд}(i-1)}, \theta_{\text{пд}i}, \theta_{\text{пд}(i+1)}, \theta_{\text{см}}, \theta_{\text{ос}}$ - соответственно температуры стенки трубы дефлегматора на $(i-1)$, i -ом и $(i+1)$ участках, температура водоаммиачной паровой смеси на i -ом участке, температура наружного воздуха;

$$\lambda - \text{коэффициент теплопроводности материала стенки трубы дефлегматора (стали)}$$

[7].

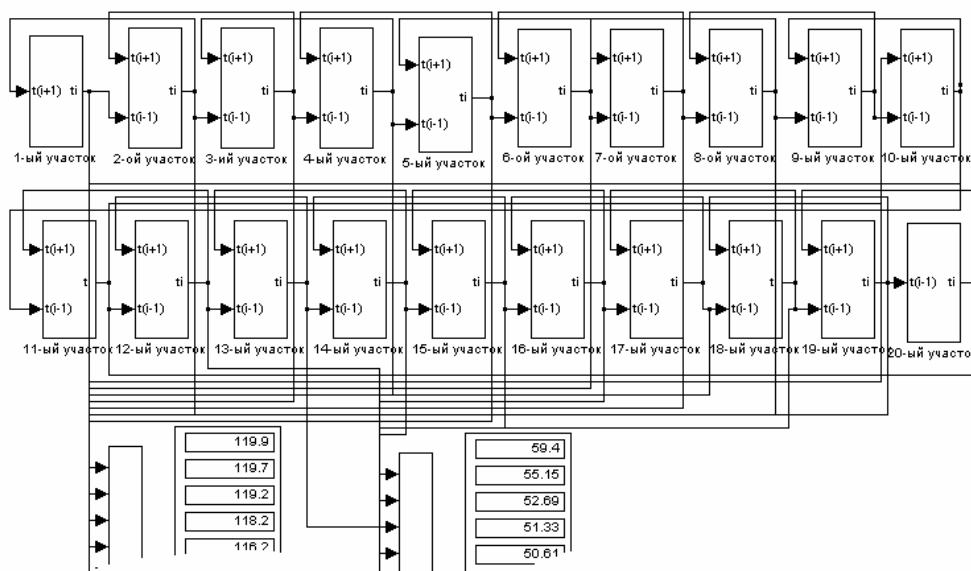
Подчеркнем, что в рассматриваемой модели принципиально не детализируются процессы конденсации и испарения внутри дефлегматора. Вместо этого задается конкретное стационарное или нестационарное, в определенной мере идеализированное, температурное поле парожидкостной смеси.

При моделировании были приняты следующие допущения:

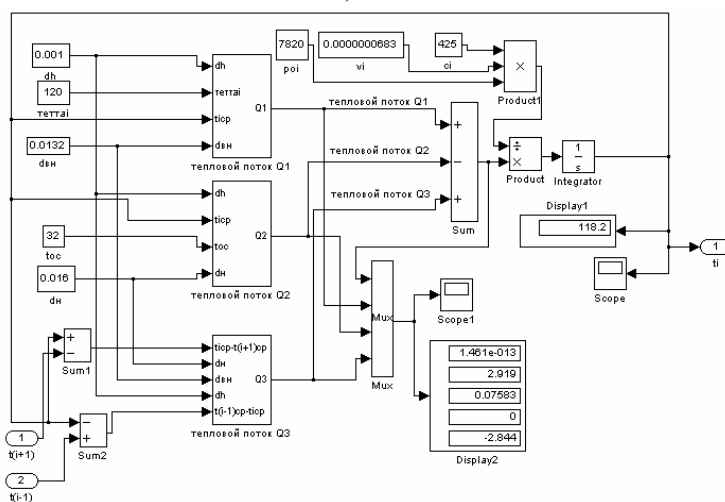
- 1) на участке Δh дефлегматора температура, концентрация парового потока и температура стенки неизменны по высоте;
- 2) в объеме участка дефлегматора высотой Δh имеет место идеальное перемешивание смеси.

В качестве примера рассмотрим АДХМ «АШ-160», выпускаемую Васильковским заводом холодильников (ВЗХ), для которой $d_n = 0.016$ м, $d_{вн} = 0.0146$ м, $a = 0.943$ и $\lambda = 46.5 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ [4].

Фрагмент реализации модели в среде имитационного моделирования Simulink и ее основной подсистемы приведен на рис. 2.



а)



б)

Рис.2 Фрагмент схемы моделирования участка дефлегматора, состоящего из 20 ячеек (а), схема моделирования одной из ячеек (б)

5. Результаты машинных экспериментов с моделью, показывающие ее работу, в том числе - в динамике, представлены на рис. 3 – 5. Они отличаются характером задавае-

мого температурного поля парожидкостной смеси (ПЖС) внутри дефлегматора. Все рассматриваемые виды этих полей идеализированы, но они позволяют хорошо проиллюстрировать и, следовательно, понять те проблемы, которые возникнут при практическом решении задачи оценки высоты подъема ПЖФ по температурному полю поверхности дефлегматора.

Рис. 3 иллюстрирует характер распределения температур вдоль поверхности дефлегматора при стационарном температурном поле ПЖС с резко выраженной границей ПЖФ:

$$\theta_{\text{пжс}}(\Delta h) = \begin{cases} 120^\circ\text{C}, & \Delta h_\phi < 0 \\ 50^\circ\text{C}, & \Delta h_\phi > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$\Delta h_\phi = 0$ -соответствует уровню ПЖФ.

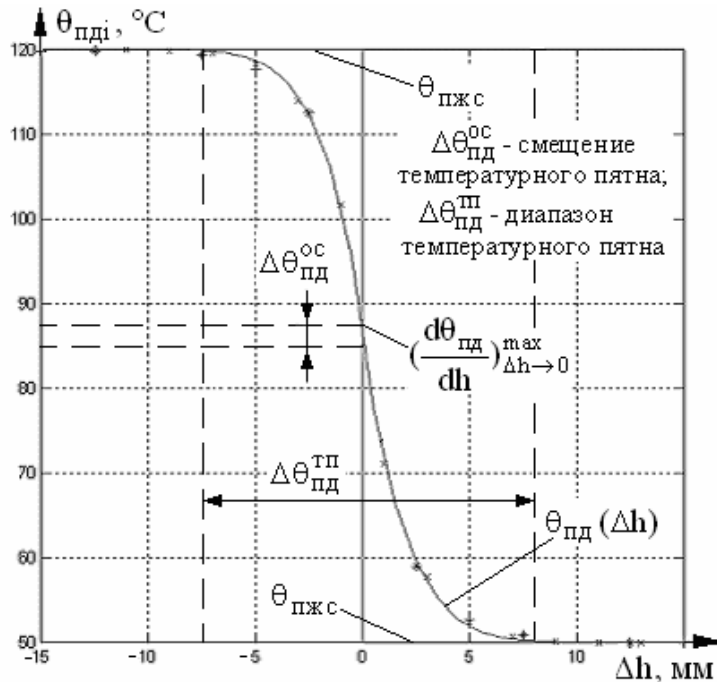


Рис.3 Установившееся температурное поле участка поверхности дефлегматора в окрестности стационарного ПЖФ (рассчитано по модели (3) с шагом разбиения ячеек 1, 2, 5 и 10 мм)

Такое вырожденное стационарное температурное поле ПЖС «порождает» (за счет аксиальных перетоков тепла) распределенное вдоль поверхности дефлегматора стационарно температурное поле – «температурное пятно» $\Delta\theta_{\text{пд}}^{\text{np}}$. Важно отметить, что в стационарном случае результаты расчета теплового поля для ячеек модели большего размера полностью соответствуют тепловому полю с «мелкими» ячейками. При этом ширина температурного пятна равна 15...20 мм, что составляет 3 – 4 % от высоты открытой подъемной части дефлегматора.

Отметим также, что максимальный градиент теплового поля $(d\theta_{\text{пд}}/dh)^{\text{max}}$, соответствующий границе ПЖФ ($\Delta h_\phi = 0$) смещен примерно на $\Delta\theta_{\text{пд}}^{\text{oc}} = 2...3^\circ\text{C}$ (примерно 5% от диапазона температурного поля ПЖС) в сторону больших температур.

Рис. 4 иллюстрирует динамику изменения температурного поля дефлегматора, когда ПЖФ с резко выраженной границей движется со скоростью 10 мм/с, а модель дефлегматора имеет разрешение по его длине $\Delta h = 1$ мм. В этом случае, по сути дела, мы получаем набор переходных характеристик дефлегматора в его разных точках, которые свидетельствуют о значительном относительном запаздывании, которое необходимо будет учитывать.

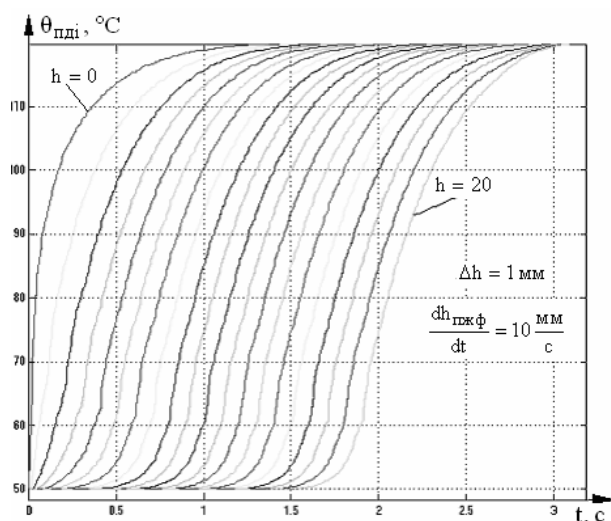


Рис.4 Динамика изменения температурного поля участка поверхности дефлегматора при перемещении ПЖФ с постоянной скоростью 10 мм/с

Рис. 5 иллюстрирует динамику изменения температурного поля дефлегматора, если температура ПЖС не имеет резкой границы и изменяется по гармоническому закону $\theta_{см} = A \cdot \omega t = 35 \cdot 0.6t$, а сам ПЖФ движется со скоростью 10 мм/с.

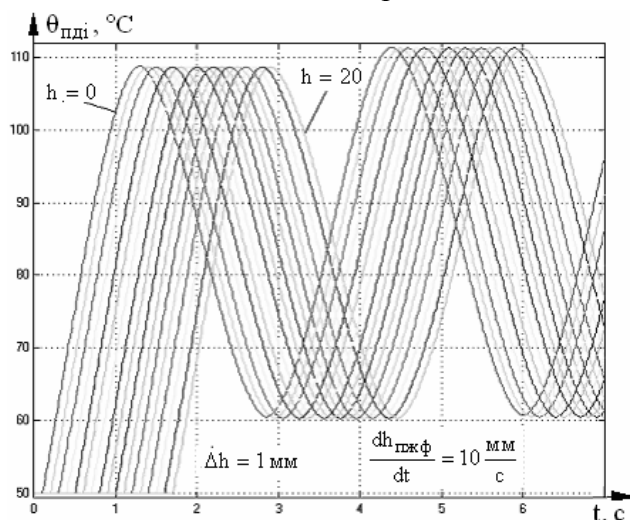


Рис.5 Динамика изменения температурного поля участка поверхности дефлегматора при изменении температуры ПЖС на входе в дефлегматор в виде гармонической функции $\theta_{пжс}(t) = 85^\circ\text{C} + 35 \sin 2t$ и скоростью перемещения 10 мм/с

Как уже отмечалось, результаты расчета распределения температур вдоль поверхности дефлегматора в стационарном случае, т.е. в случае, когда уровень ПЖФ не меняется во времени, не зависят от выбранного шага Δh модели. Но в нестационарном случае такого совпадения не будет. Рис. 6 иллюстрирует это несовпадение для переходных характеристик моделей с различным Δh , приведенными к одной точке поверхности дефлегматора.

6. Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующий вывод.

Математическая модель распределения тепла вдоль поверхности дефлегматора с распределенными параметрами достаточно просто реализуется численными методами в виде ячеистой модели. Это дает основания разрабатывать систему измерения температуры ПЖС внутри дефлегматора на основе этой модели, решая ее в реальном времени в форме обратной задачи. Исходные данные для ее решения – измеренные значения температур в выбранных точках поверхности дефлегматора. Расстояние между этими точками должно

быть уточнено в ходе экспериментов с реальными АДХМ, где должна быть использована такая система измерения. Эти эксперименты позволят оценить характер распределения температур в окрестности ПЖФ, и, возможно, конкретизировать его характеристики. Все это позволит по температуре ПЖС определять положение ПЖФ. При проведении таких экспериментов, расстояние между датчиками температуры не должно превышать 5 мм. Следует также отметить, что для таких расстояний при расчете температур ПЖС необходимо компенсировать динамическую составляющую погрешностей измерений.

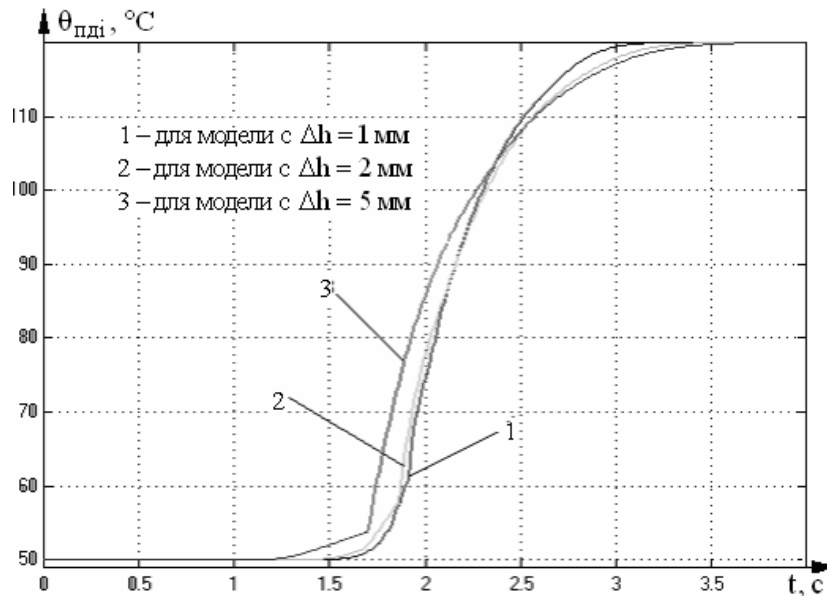


Рис.6 Результаты моделирования при измерении температуры на 20 мм

A question of the attempt to increase energy work efficiency of absorption-diffusion refrigeration to the account of optimal working body assessment to the constructional elements is considered. It was shown that working body assessment could be controlled by deflegmator rising lot side temperature. However during such control realization it is necessary to take into account the heat acsial flows, which can distort the results of measurings and, as a result, to lead to inadequate operate influence forming.

1. Захаров Н.Д., Тюхай Д.С., Титлов А.С., Васылив О.Б., Халайджи В.Н. Проблемы энергосбережения в бытовой абсорбционной холодильной технике //Холодильная техника и технология. – 1999. – № 62. – С. 108 – 119.

2. Хобин В.А., Мазур А.В. Повышение эффективности и ресурса эксплуатации абсорбционных холодильных машин средствами гарантирующего управления //Системный анализ, управление и информационные технологии: Сб. науч. тр. 12-ой Международ. конф. по автомат. упр-нию «Автоматика – 2005» / Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. – № 55. – С. 19 – 24.

3. Titlova O.A., Hobin V.A., Mazur A.V. Automatic control system` development, minimizing energy consumption of absorption refrigeration vehicles // Energy Challenges of the 21st Century: Science, Technology, Economy, Society: Book of abstract. – Odessa: OSAR. – 2007. – P. 120 – 121.

4. Бабакин Б.С., Выгодин В.А. Бытовые холодильники и морозильники. (Справочник) / 3-е изд., испр. и доп. – Рязань, "Узоречье", 2005. – 860 с.

5. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: Пер с англ. – М.: Мир., 1983. – 512 с.

6. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.

7. Богданов С.И., Иванов О.П., Куприянова А.В. Холодильная техника. Свойства веществ // Изд. 3-е перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – 208 с.

АПАРАТНІ ЗАСОБИ СЕГМЕНТАЦІЇ МОВНОГО СИГНАЛУ

Шиманські З.

Постановка задачі.

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій обробки мовних сигналів характеризується розширенням галузей застосування, в значній частині з яких вимагається опрацювання потоків даних у реальному часі на апаратних засобах, що задовольняють обмеженням щодо габаритів, енергоспоживання та вартості [1-4]. Створення таких апаратних засобів вимагає широкого використання сучасної елементної бази (напівзамовних і замовних надвеликих інтегральних схем (НВІС), однокристальних процесорів цифрової обробки сигналів), розробки апаратно-орієнтованих методів і алгоритмів. Однією із основних проблем в інформаційних технологіях обробки мовних сигналів є проблема перетворення мовних сигналів у часові області, яка використовується при розпізнаванні та синтезі мовних сигналів, верифікації та ідентифікації дикторів, в системах кодування та передавання каналами зв'язку. Перетворення мовних сигналів в часові області знаходить застосування в автоматизованих системах управління, коли необхідно змінювати темп подання мовної інформації оператору в залежності від його фізичного та емоційного стану [1,2].

При розв'язанні проблеми перетворення мовних сигналів в часові області однією із основних задач є задача автоматичного сегментування мовних сигналів, успішне розв'язання якої тісно зв'язано з наступними процедурами опрацювання мови. Аналіз процесу сегментації [2] показує, що він вимагає виконання таких етапів:

- виділення мовного сигналу на фоні шуму та пауз;
- сегментації на основі критерію правдоподібності;
- аналізу сегментів та виділення параметрів;
- класифікація сегментів.

Таким чином, актуальною задачею є розробка апаратних засобів для сегментації мовного сигналу у реальному часі з високою ефективністю використання обладнання.

Розв'язання задачі.

Алгоритми сегментації. Проаналізуємо алгоритми реалізації кожного із етапів сегментації мовного сигналу [2].

Виділення мовного сигналу на фоні шуму та пауз. Визначення точних моментів початку і завершення мовного сигналу на фоні шуму має суттєве значення для якості сегментації, наступної обробки та кількості арифметичних операцій. Для реалізації даного етапу використовуються алгоритми, які враховують тільки два параметри мовного сигналу $x(n)$ – короткочасну енергію $E(n)$ та короткочасне середнє число переходів через нуль $S(n)$. Дані параметри визначаються так:

$$E(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} |x(m)|h(n-m),$$

$$S(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} |\text{sign}[x(m-1)]|h(n-m),$$

де $\text{sign}[x(m)] = \begin{cases} 1, & \text{коли } x(n) \geq 0 \\ -1, & \text{коли } x(n) < 0 \end{cases}$,

а $h(n)$ – прямокутна вагова функція тривалістю 10 мілісекунд.

Сегментація на основі критерію правдоподібності. Основною ідеєю даного методу є використання статичного критерію максимальної правдоподібності, за допомогою порівнюються декілька моделей сусідніх сегментів мовного сигналу та визначаються моменти

різкої зміни параметрів моделей. Кожний однорідний сегмент мовного сигналу описується авторегресійною моделлю $M(A, \delta)$ порядку p з параметрами $A = (a_1, a_2, \dots, a_p)$, де a_i - коефіцієнти лінійного передбачення, δ^2 - дисперсія похибки передбачення.

Приймаються дві гіпотези-альтернативи:

H1: сигнал (y_1, \dots, y_n) описується моделлю $M_0(A_0, \delta_0)$;

H2: у момент часу r відбувається стрибкоподібна зміна моделі, так що сигнал (y_1, \dots, y_r) описується моделлю $M_1(A_1, \delta_1)$, а сигнал (y_{r+1}, \dots, y_N) – моделлю $M_2(A_2, \delta_2)$.

Статичний критерій базується на узагальненому відношенні правдоподібності між цими двома гіпотезами:

$$D(r) = -(n-r) \ln \delta_2^2 - r \ln \delta_1^2 - n \ln \delta_0^2. \quad (1)$$

Рішення про наявність різкої зміни моделі приймаються якщо:

$$\min_{\delta_0 A_1 \delta_1} \max_{\delta_1 A_2 \delta_2} \max_{\gamma} D_n > D_0$$

Біжуче значення r визначається як аргумент виразу (1). Оскільки така багатовимір-на оптимізація вимагає значних обчислювальних затрат, то на практиці використовується дещо спрощена процедура.

Аналіз сегментів та виділення параметрів. Для аналізу використовуються такі параметри:

- E – короткочасна енергія мовного сигналу, визначена на всьому діапазону частот;
- E_H/E_B – відношення енергії в діапазоні низьких частот (250-600 Гц) до енергії мовного сигналу в діапазоні високих частот (650-3000 Гц).

В системах аналізу та розпізнавання мови використовують такі параметри: тривалість виділеного сегменту мовного сигналу; середнє число переходів через нуль; частота основного тону; набір коефіцієнтів лінійного передбачення; частота формант та інші.

Класифікація сегментів. Класифікація виділених у процесі сегментації звукових сегментів мовного сигналу проводиться на основі приведених вище параметрів. На першому кроці на основі значень першого коефіцієнту авторегресії A та короткочасної енергії E всі сегменти поділяються на дві групи: вокалізовані та невокалізовані. Сегменти, для яких $A_1 > -0,4$ класифікуються як невокалізовані, а сегменти, для яких $A_1 < -1,5$ класифікуються як вокалізовані. Для решти сегментів обчислюється ознака O_B на основі співвідношення:

$$O_B = 0,03E - A.$$

Рішення про вокалізованість сегменту приймається у випадку коли $O_B > 2,2$.

Наступним кроком є розділення вокалізованих сегментів на вокалізовані голосні та вокалізовані приголосні. Основними факторами, які враховуються при цьому є:

- перевищення значення енергії E порогової величини в моменти ПГ (приголосна-голосна);
- більша концентрація енергії в низькочастотній області у голосних звуків.

Розробка структури апаратних засобів сегментації мовного сигналу. Розробку апаратних засобів сегментації мовного сигналу пропонується здійснювати на основі інтегрованого підходу, який охоплює [4]:

- сучасну елементну базу інформаційних технологій обробки мовних сигналів;
- методи та алгоритми сегментації мовного сигналу;
- методи та засоби автоматизованого проектування апаратного і програмного забезпечення;
- нові архітектурні та схемотехнічні рішення.

Апаратні засоби сегментацію мовного сигналу повинні забезпечувати високу ефективність використання обладнання та роботу в реальному часі. Проведений аналіз алгори-

тмів сегментації мовних сигналів показав, що дані алгоритми є складними з великою кількістю логічних операцій. Ефективно реалізувати такі алгоритми можна шляхом одночасного використання універсальних і спеціальних підходів, апаратних і програмних засобів. В основу структурної організації таких апаратних засобів пропонується покласти принципи, які дозволять підвищити ефективність використання обладнання, зменшити вартість і терміни розробки. Аналіз показує, що забезпечити такі вимоги можна при використанні наступних принципів: змінного складу обладнання, модульності, узгодженості та відкритості програмного забезпечення.

Елементна база. Основною елементною базою, яка використовується для реалізації апаратних засобів сегментації мовного сигналу є однокристалні програмовані мікропроцесори і мікро-ЕОМ, архітектура яких орієнтована на розв'язання задач цифрової обробки сигналів (ЦОС) та спеціалізовані НВІС [5,6].

В мікропроцесорах і мікро-ЕОМ ЦОС за рахунок вдалих архітектурних і технологічних рішень вдалось поєднати високу швидкодію виконання базових операцій ЦОС з ефективною реалізацією алгоритмів управління та прийняття рішень. Особливостями архітектури мікропроцесорів і мікро-ЕОМ ЦОС є:

- розвинута багатоштинна організація, яка дозволяє виконувати пересилання даних між різними функціональними вузлами;
- одночасне транспортування всіх операторів до операційного пристрою;
- використання апаратних засобів для одночасного виконання операції множення з підсумовуванням;
- виконання паралельно з основними операціями функцій адресації, переадресації, розгалуження програм;
- застосування апаратно вбудованих засобів організації циклічних обчислень, що переважають в алгоритмах ЦОС;
- використання модифікованої гарвардської архітектури;
- набір команд для виконання з підвищеною точністю арифметичних операцій;
- короткий командний цикл і виконання більшості команд за один цикл;
- здатність підтримувати конвеєрну обробку;
- зменшення довжини арифметичного конвеєра за рахунок використання багатопроцесорної пам'яті;
- використання для обміну швидкодіючих каналів прямого доступу до пам'яті і механізму підтримки багатопроцесорності.

Спеціалізовані НВІС за способом проектування і виготовлення, тобто налаштуванням на виконання конкретного алгоритму діляться на два класи: замовні і напівзамовні [5].

Замовні НВІС - це мікросхеми, розроблені на основі стандартних або спеціально створених елементів і вузлах за схемою замовника. Особливістю замовних НВІС є оптимізація елементів і зв'язків, що дозволяє досягнути граничних значень параметрів для кожного рівня технології.

Напівзамовні НВІС - це мікросхеми, що складаються з двох частин: наперед спроектованої постійної та змінної - замовної, структура якої визначається замовником. До напівзамовних НВІС відносяться мікросхеми на основі базових матричних кристалів (БМК) та програмовані користувачем логічні інтегральні схеми (ПЛІС). Проектування пристроїв на базі ПЛІС здійснюється методом завантаження необхідної конфігурації в елементи "тіньової" пам'яті. При використанні БМК спеціалізація НВІС здійснюється за рахунок нанесення відповідних шарів з'єднань. Основними елементами БМК є базові комірки, що складаються з набору незкоматованих елементів-транзисторів і резисторів. На базі таких елементів реалізуються функціонально завершені вузли, які виконують елементарні функції типу І-НЕ, АБО-НЕ та інші.

Структура аппаратних засобів сегментації мовного сигналу. Структура аппаратних засобів сегментації мовного сигналу наведена на рис.1, де АЦП – аналого-цифровий перетворювач, БП – багатопортова пам'ять, ПЦОС – процесор ЦОС, АР – аппаратний розширювач.

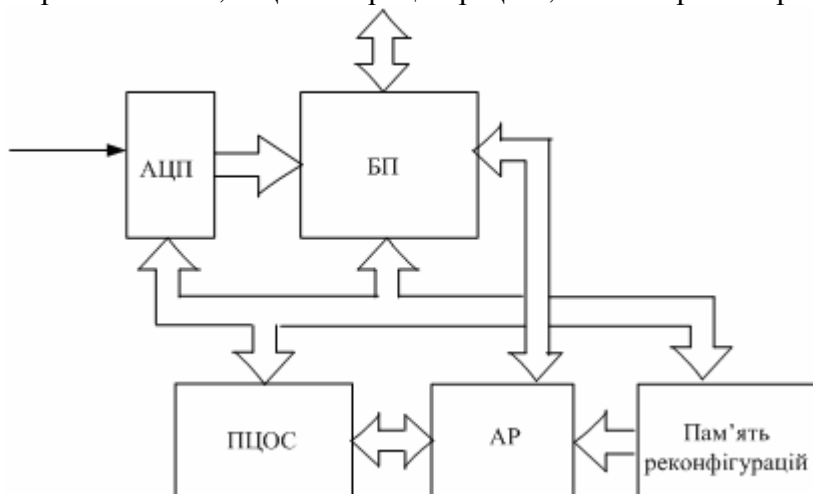


Рис.1 Структура аппаратних засобів сегментації мовного сигналу

Основним елементом аппаратних засобів сегментації мовного сигналу є ПЦОС, основні характеристики якого визначаються особливостями архітектури і технічними характеристиками мікропроцесора ЦОС. До числа таких характеристик відносяться: довжина інформаційного слова, час реалізації основних команд, обсяг внутрішньокристалічної пам'яті даних і програм. Порівняння характеристик мікропроцесорів ЦОС різних фірм показує, що відмінності між мікропроцесорами одного покоління є несуттєвими. Це пояснюється близькістю архітектури і використанням для їх реалізації приблизно однакових за рівнем технологій. Тому структури аппаратних засобів сегментації мовного сигналу на основі мікропроцесорів ЦОС різних фірм одного покоління не будуть мати істотних відмінностей. За повнотою родини, за існуючими технологічними інструментальними засобами та за кількістю розробленого програмного забезпечення мікропроцесори ЦОС фірми Texas Instruments TMS 320 переважають МП інших фірм. Тому аппаратні засоби сегментації мовного сигналу доцільно реалізовувати на мікропроцесорі ЦОС серії TMS 320C50. Самостійно мікропроцесор ЦОС не відповідає вимогам, які ставляться до ПЦОС за ємністю пам'яті, завадостійкістю та навантажувальною здатністю інтерфейсу. Задовольнити такі вимоги можна шляхом доповнення мікропроцесора ЦОС зовнішньою оперативною пам'яттю та розширювачем інтерфейсу. Особливістю структурної організації ПЦОС є відділення мікропроцесора від зовнішніх пристроїв, що дозволило підвищити завадостійкість і сумістити у часі роботу мікропроцесора та зовнішніх пристроїв.

У аппаратних засобах сегментації мовного сигналу для взаємодії між ПЦОС і зовнішніми пристроями використовується БП, яка забезпечує зменшення часу обміну та розв'язує проблеми пов'язані з синхронізацією роботи всіх пристроїв, що до неї підключаються [7]. Для забезпечення режиму реального часу найскладніші алгоритми з великою кількістю обчислювальних операцій реалізуються аппаратним шляхом за допомогою АР. Архітектура АР відображає структуру алгоритму розв'язання задачі та дозволяє повною мірою використовувати можливості НВІС-технології, враховувати вартість площі кристала, а також кількість вхідних і вихідних виводів. АР реалізується на ПЛІС з динамічним репрограмуванням, що забезпечує оперативне переналаштування на реалізацію конкретного алгоритму. Узгодження обчислювальної здатності аппаратних засобів сегментації мовного сигналу з інтенсивністю надходження даних забезпечує високу ефективність використання обладнання. Для оцінки ефективності використання обладнання E доцільно використовувати критерій, який зв'яже продуктивність системи з витратами обладнання та

дає оцінку її елементам (вентилям) за продуктивністю [4]. Кількісна величина ефективно-сті використання обладнання для такого компоненту визначається наступним чином:

$$E = \frac{R}{W_c T_p}$$

де R – складність алгоритму розв’язання задачі у кількості елементарних операцій; W_c - витрати обладнання на реалізацію системи обробки мовних сигналів в вентилях; T_p - час розв’язання задачі.

Висновки:

1. Запропоновано розробку апаратних засобів сегментації мовного сигналу в реальному часі з високою ефективністю використання обладнання здійснювати на основі інтегрованого підходу, який охоплює сучасну елементну базу, методи та алгоритми сегментації мовних сигналів, нові, орієнтовані на НВІС-реалізації, алгоритмічні, архітектурні та схемотехнічні рішення.

2. Показано, що для ефективної сегментації мовного сигналу в реальному часі необхідно використовувати універсальні та спеціальні підходи, апаратні і програмні засоби.

3. Для вибору і оцінки апаратних засобів сегментації мовних сигналів у реальному часі запропоновано використовувати критерій ефективності використання обладнання, який зв’язує продуктивність з витратами обладнання та дає оцінку елементам системи за продуктивністю.

4. При побудові апаратних засобів сегментації мовних сигналів універсалізація розглядається як засіб скорочення номенклатури та зменшення затрат, а спеціалізація – як засіб підвищення швидкодії.

Methods and algorithms for segmentation of speech signals are analyzed, proposed the structure of hardware for segmentation of speech signal in real time and analytical expression for estimation effectiveness of use equipment are developed.

1. Вінцюк Т.К. Интеллектуальні усно мовні інформаційні технології та системи// Праці третьої всеукраїнської конференції “Укробраз-96”.- К.: ІК АН України, 1996.- С117-120.

2. Рашкевич Ю.М. Перетворення часового масштабу мовних сигналів. Львів. Академічний Експрес, 1997. – 143с.

3. Шиманські, Р. Фігура, Р. Марцишин. Особливості перетворення часової структури дифтонгів польської мови. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. №468, 2002. – С.170-174.

4. Цмоць І.Г. Інформаційні технології та спеціалізовані засоби обробки сигналів і зображень у реальному часі. – Львів: УАД, 2005.- 227с.

5. Грушицкий Р.И., Мурсаев А.Х., Угрюмов Е.П. Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 608с.

6. Кунг С. Матричные процессоры на СБИС. – М.- Мир.- 1991.- 672с.

7. Пат. №23358А Україна, МПК G11 С11/00. Багатопортова пам'ять / Демида Б.А, Рашкевич Ю.М, Цмоць І.Г. Бюл. №4, 1998.

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 004.9

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ ОПАСНОСТИ В ИСКУССТВЕННЫХ ИММУННЫХ СИСТЕМАХ

Бардачев Ю.Н., Дидык А.А.

Введение. В последние годы компьютерные системы становятся все более и более сложными, и, следовательно, проблема защиты этих систем становится все более и более трудно разрешимой. Для противодействия злоумышленному использованию компьютерных систем были разработаны различные методики, такие как межсетевые экраны (firewalls), антивирусные программы и системы обнаружения вторжений. Сложность сетей и динамическая природа компьютерных систем оставляет большое поле деятельности для усовершенствования современных методов обеспечения компьютерной безопасности.

С недавнего времени ученые стали черпать идеи из механизмов биологических систем и, в контексте компьютерной безопасности, сосредоточили свое внимание на человеческой иммунной системе (ЧИС). Человеческая иммунная система дает пример устойчивой, распределенной системы, которая обеспечивает высокий уровень защиты от постоянных атак. Исследуя механизмы человеческой иммунной системы, можно надеяться, что данная парадигма улучшит рабочие характеристики существующих систем обнаружения вторжений.

Целью работы является рассмотреть возможности применения новой иммунологической парадигмы – теории опасности – для разработки искусственных иммунных систем.

Изложение основного материала. Начиная с 1959 года, основной постулат иммунологии утверждал, что человеческая иммунная система воздействует на объекты, которые не являются частью человеческого организма. Поэтому реакция организма на такие объекты является результатом классификации ЧИС собственных клеток как *своих* и всех остальных клеток как *чужих* [1]. ЧИС выполняет классификацию, распознавая протеины, найденные на поверхности инородных клеток (известных как антигены). Инородные клетки по структуре и форме отличаются от клеток, существующих в организме человека.

Однако, существует множество примеров, когда такой подход терпит неудачу. Например, кишечный тракт подвергнут воздействию пищи и множества различных бактерий, которые не определены как «свои» и не инициируют иммунный ответ. Кроме того, модель «свой-чужой» не может объяснить явления аутоиммунных болезней. На пример, в случае рассеянного склероза, ЧИС подвергает атакам определенные клетки, которые классифицированы как «свои». В 1994, Полли Матзингер [2] выдвинула предположение, что в этом случае ЧИС не воздействует на «своих» или «чужих», а использует защитный механизм *распознавания опасности*. Метод обнаружения опасности является основой Теории Опасности.

Теория опасности не отрицает существования разграничения на «свой-чужой», а скорее определяет, что существуют другие факторы, приводящие к инициированию иммунного ответа. Полагается, что ЧИС отвечает на определенные сигналы об опасности, произведенные в результате клеточного *некроза* (неожиданного стресса и/или смерти клетки).

Смерть клетки - естественный процесс, который происходит внутри человеческого организма в результате гомеостатической стабилизации. Этот процесс является

результатом работы предварительно запрограммированного и строго управляемого механизма, известного как *апоптоз*. Теория опасности предполагает, что в результате смерти клетки происходят различные биохимические реакции, которые в свою очередь вызывают различные сигналы опасности. Полагается, что эти сигналы могут способствовать возникновению иммунного ответа. Эта теория, вызывающая споры в рядах иммунологов, предлагает потенциальное объяснение многих явлений, где модель «свой-чужой» терпит неудачу.

Искусственные иммунные системы основаны на модели человеческой иммунной системы «свой-чужой». Алгоритмы, разработанные на основании данной модели, показали в значительной мере свою эффективность [3]. Искусственные иммунные системы были разработаны для широкого диапазона приложений от переработки данных до информационной безопасности. Во многих случаях, эти приложения дали результаты сопоставимые со стандартными методиками или даже превосходящие их.

Например, отрицательный отбор иммунных клеток в тимусе для распознавания «свой-чужой» был применен в системе *Lisys* и использовался как сетевой инструмент обнаружения вторжений [4]. Эта система классифицировала нормальное поведение пользователя как «свой», и любое другое поведение как «чужой».

Однако, данный подход оказался не способным к масштабированию, как ожидалось, для использования в больших, динамических средах. Одним из объяснений такой несостоятельности данного подхода может быть то, что не все процессы, необходимые для полной функциональности иммунной системы, были включены в данную модель. Существует также ряд других факторов, объясняющих это:

- механизм отрицательного отбора несовершенен; поэтому аутореактивные реакции системы (ошибочные положительные срабатывания) неизбежны.
- граница между «своими» и «чужими» размыта, так как зачастую «свои» и «чужие» антигены совместно используют общие области.
- «свои» претерпевают изменения с течением времени. Поэтому, возможны проблемы с клетками памяти, которые позже могут оказаться неточными или даже аутореактивными.

Используя механизмы теории опасности при разработке искусственных иммунных систем, желательно учитывать следующие факторы:

- в модели, основанной на теории опасности, необходимо наличие антиген-презентирующей клетки, которая может представить соответствующий сигнал опасности.
- «опасность» – эмоциональный термин. Сигнал может не иметь никакого отношения к опасности.
- соответствующий сигнал опасности может быть позитивным (наличие сигнала) или негативным (его отсутствие).
- в биологических системах опасная зона является пространственной. В искусственных иммунных системах может использоваться другая мера близости (например, временная).
- инициализация аналога иммунного ответа в искусственной иммунной системе не должна вести к дальнейшему возникновению новых сигналов опасности. В естественных системах клетки-килеры вызывают нормальную смерть клетки (апоптоз), а не опасность (некроз).
- для большего эффекта Матзингер предлагает примировать клетки-килеры через антиген-презентирующие клетки. В зависимости от используемой иммунной системы (это имеет смысл только для пространственно распределенных моделей) это предложение может иметь смысл.
- есть множество факторов, которые в меньшей степени относятся непосредственно к теории опасности. Например, миграция – сколько антител получает сигнал от данной антиген-презентирующей клетки.

Использование теории опасности в задачах обнаружения вторжений. Системы

обнаружения вторжений (СОВ) разрабатываются для того, чтобы обнаруживать события, происходящие в компьютерной системе, которые могут поставить под угрозу ее целостность или конфиденциальность [5]. СОВ часто подразделяется на две категории: *обнаружение злоумышленного поведения* и *обнаружение аномального поведения*. Методики обнаружения злоумышленного поведения заключаются в описании атаки в виде шаблона или сигнатуры и поиске данного шаблона в контролируемом пространстве (например, сетевом трафике или деятельности системы). Эта методика эффективна при обнаружении уже известных атак. Однако, такой подход не годится для обнаружения новых, еще неизвестных атак.

Системы обнаружения аномального поведения основаны на модели поведения пользователя, которое рассматривается как «нормальное». Это достигается путем использования комбинации статистических методов и методов машинного обучения для исследования сетевого трафика или системных вызовов и процессов. Обнаружение новых атак с использованием подхода обнаружения аномалий является более эффективным, поскольку любое поведение, не определенное как «нормальное», классифицируется как атака или вторжение. Однако, «нормальное» поведение в больших динамических системах сложно полностью определить, и оно изменяется с течением времени. Это часто приводит к появлению значительного количества ложных тревог, известных как *false positives*. Снижение количества ложных срабатываний СОВ является ключевой проблемой, решение которой в состоянии предложить теория опасности.

Предполагается, что использование теории опасности для разработки методов обнаружения вторжений позволит создавать системы, способные эффективно реагировать как на известные угрозы информационной безопасности, так и на новые атаки, а также позволить снизить количество ложных тревог, столь обычных для систем обнаружения аномального поведения [6]. Теория опасности предполагает, что ЧИС обнаруживает сигналы опасности и продуцирует ответ, основанный на сопоставлении этих сигналов. Подобная концепция может использоваться в системах обнаружения вторжений. Это позволит реализовать систему, способную разделять поведение на *апоптическое* и *некротическое*. Апоптическое поведение может быть определено как низкоуровневые, шумовые тревоги, которые самостоятельно не формируют какого-либо значимого аномального поведения, но зачастую являются предпосылкой для атаки. Некротические тревоги могут быть результатом более серьезных атак, в результате которых имеют место существенные повреждения системы [7]. Другие виды сигналов опасности, относящиеся к самой физической системе, могут быть также использованы в этой модели. Потенциал для дальнейших разработок в этой области и успешное сопоставление таких тревог позволит значительно повысить эффективность как систем обнаружения вторжений, так и искусственных иммунных систем в целом.

Теория опасности в задачах переработки данных. На первый взгляд, не ясно как теория опасности может быть полезной для решения задачи переработки данных, описанной в [8], так как в этом случае не используются понятия «свой» и «чужой». В сущности, в задаче переработки данных вся система является «своей». Однако при более пристальном рассмотрении, выделение «своих» и «чужих» в этом случае не является проблемой.

Например, метки «свой» и «чужой» могут быть заменены на «интересные» и «неинтересные» данные. В этом случае, искусственная иммунная система применяется как классификатор. Далее, если далее предположить, что интересные данные расположены «близко» или «рядом» с другими интересными данными, то возможно использовать механизм теории опасности. Для этого необходимо определить «близко»/«рядом». Можно использовать:

- физическую близость, например расстояние в базе данных, полученное с помощью соответствующей метрики.
- корреляцию данных, измеренную статистическими методами.

- подобие времени ввода данных в базу данных.
- размер файла.

Сигнал опасности, таким образом, может быть интерпретирован как полученная порция ценная (интересной) информации. Следовательно, стимуляции подвергаются те антитела, которые соответствуют данным, которым «близка» эта ценная информация.

Принимая эту идею, можно определить сигнал опасности как идентификатор интереса пользователя. Учитывая это определение, можно представлять различные сценарии, в которых может быть полезен сигнал опасности.

Возьмем для примера пользователя, просматривающего ряд документов. Каждый документ обладает некоторыми свойствами (например, ключевые слова, заголовок, автор, дата и т.д.). Предположим, что есть искусственная иммунная система, функционирующая как «наблюдатель», антитела которой соответствуют свойствам документа. Таким образом, «интересными» документами являются те, свойства которых соответствуют антителам иммунной системы.

Когда пользователь либо явно, либо неявно проявляет интерес к текущему документу, возникает сигнал «опасности».

Стимулируемые антитела становятся исполнительными эффекторами, и таким образом иммунная система обучается и выполняет фильтрацию, т.е. ищет другие интересные документы. Интересные документы могут быть представлены вниманию пользователя. Важно то, что понимание пользователем «интересности» документа может со временем измениться и иммунная система может своевременно адаптироваться к таким изменениям.

Этот пример является иллюстрацией того, как механизмы теории опасности могут быть использованы для разработки искусственных иммунных систем, используемых для решения задач, в которых значение понятия «опасность» не является очевидным.

Выводы. Теория опасности не предоставляет новых механизмов представления данных для искусственных иммунных систем. Данная теория определяет, какие данные в искусственных иммунных системах должны быть представлены и обрабатываться: внимание должно быть сфокусировано на опасных, т.е. интересных данных. Проблема заключается в выборе соответствующего сигнала опасности. Кроме того, мера физического расстояния в биологической системе должна быть интерпретирована как адекватная мера подобия или причинно-следственной связи в искусственной иммунной системе. В данной статье был приведен пример, как можно решить эту проблему в задаче переработки данных. Однако, не смотря на перечисленные трудности, применение механизмов теории опасности для построения искусственных иммунных систем в различных областях знаний позволит значительно повысить их эффективность.

Over the last decade, a new idea challenging the classical self- non-self viewpoint has become popular among immunologists. It is called the Danger Theory. Possibilities of application of new approach for development of artificial immune systems used in the field of information security and data mining are considered in this paper. Substantive states of the danger theory are short given.

1. Aickelin U., Bentley P., Cayzer S., Kim J. and McLeod J., 2003, 'Danger Theory: The Link between AIS and IDS?', in Proceedings ICARIS-2003, 2nd International Conference on Artificial Immune Systems, 147-155.
2. De Castro, L.N. and Timmis, J., 2002, 'Artificial Immune Systems: A New Computational Approach, Springer-Verlag, London. UK.
3. Hofmeyr S. and Forrest S., 2000, 'Architecture for an Artificial Immune System', Evolutionary Computation, 8,(4), 443-473.
4. Matzinger P., 2002, 'The Danger Model: A Renewed Sense of Self', Science, 296, 301-305.
5. Medzhitov R. and Janeway C, 2000, 'How does the immune system distinguish self from nonself?', Seminars in Immunology, 12, 185-188.
6. Twycross J., 2004, 'Immune Systems, Danger Theory and Intrusion Detection', AISB 2004 Symposium on Immune System and Cognition (ImmCog-04) , Leeds, U.K.
7. Venter H. and Eloff J., 2003, 'A Taxonomy for Information Security Technologies', Computers & Security, 22, (4), 299-307.
8. Cayzer S., Aickelin U. A Recommender System based on the Immune Network, Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation, 2002.

КОМПЕНСАЦИЯ ОШИБОК ОПЕРАТОРА В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СИНТЕЗИРУЕМЫХ ВЕЙВЕЛЕТ- СЕТЕЙ

Литвиненко В.И., Четырин С.П.

Введение в проблему

Наличие оператора в контуре слежения за целью требует учёта психофизиологических способностей человека при формировании структуры и характеристик машинной части системы слежения.

В настоящее время сложились определённые представления о процессах, качественно характеризующих работу оператора в контуре слежения [1,2,3]:

- разрешение сетчатки глаза, передача сигнала в кору головного мозга, выработка сигналов управления, передача сигналов к исполнительному органу и прохождение сигнала обратной связи происходит с некоторой задержкой τ_3 , величина которой порядка 0,2÷0,4 с. Запаздывание выполнения ответных действий на возникший стимул не является постоянной величиной, оно меняется как от изменения условий работы, так и от способностей конкретных индивидуумов. Для конкретного оператора оно также меняется, в процессе работы в зависимости от напряжённости выполняемой работы, утомляемости, тренированности и т.п.;

- в первом приближении при относительно узком диапазоне движений исполнительного органа (рука, голова и т.п.) человека-оператора можно считать линейным звеном, что позволяет проводить анализ качества слежения оператором за целью методами линейных систем автоматического управления;

- человек-оператор в переходном процессе, в среднем ведёт себя как реальное интегрирующее звено;

- человек является весьма пластичным звеном и, как правило, подстраивает свою передаточную функцию (структуру и параметры) под амплитудно-частотные характеристики сигнала, т.е. адаптируется под них;

- наблюдение ошибки слежения во времени сопровождается оценкой скорости её изменения, что позволяет создать представление о величине упреждённого значения ошибки на время упреждения T_y ;

- оператор, находясь на качающемся основании, включает в процесс слежения не только зрительную информацию, но и сигналы органов равновесия, что приводит к существенному повышению точности слежения. По экспериментальным данным в зависимости от типа объекта управления относительная величина дисперсии ошибки слежения при использовании сигналов органов равновесия снижается от 20 до 50%.

Исходя из сложившихся представлений и на основе экспериментальных исследований, приведенных в [3], для моделирования функционирования следящей системы может быть выбрана передаточная функция звена «человек-оператор» в виде

$$\Phi_{on}(p) = \frac{e^{-\tau_3 p}}{(T_{on} p + 1)^2} \quad (1)$$

Однако параметры и вид функции могут быть разными не только для разных операторов, но и для одного и того же в различных условиях. Таким образом, системы слежения, в которых человек включен в контур управления, можно отнести к классу систем управления с неполной информацией, со сложной, немоделируемой динамикой и неконтролируемым изменением собственных свойств.

Поэтому для компенсации ошибки оператора в контуре следящей системы предлагается построить его идентифицирующую модель на основе вейвлет-сетей.

Постановка задачи: Разработать методику создания и настройки идентифицирующих вейвлет-нейронных сетей при помощи искусственных иммунных систем для компенсации ошибки человека-оператора в контуре управления следящей системы.

Решение задачи

1. Вейвлет-преобразования

Вейвлет («всплеск», «выброс», «короткая волна») представляют собой волновые функции, способные осуществлять преобразование Фурье не по всей временной оси, а локально по месту своего расположения. Вейвелеты используют в случаях, когда результат анализа исследуемого сигнала должен содержать не только перечисление его характерных частот (масштабов), но и сведения об определенных локальных координатах, при которых эти частоты проявляют себя. Основным полем применения вейвлет-анализа является анализ и обработка нестационарных (во времени) или неоднородных в (пространстве) сигналов разных типов. Общий принцип построения базиса вейвлет-преобразования и смещений. Любой из наиболее часто применяемых вейвелетов порождает полную ортонормированную систему функций с конечным носителем, построенную с использованием масштабного преобразования сдвигов. За счет изменения масштабов вейвелетов способны выявить различие в характеристиках на разных шкалах, а путем сдвига проанализировать свойства сигнала в разных точках на всем изучаемом интервале. При анализе нестационарных сигналов за счет свойств локальности вейвелеты имеют существенное преимущество перед преобразованием Фурье.

Непрерывное вейвлет-преобразование является скалярным произведением $f(x)$ и базисных функций.

$$\varphi_{\sigma,c} = \sigma^{-1/2} \varphi\left(\frac{x-c}{\sigma}\right), \sigma \in R^+, c \in R \quad (2)$$

Базисные функции $\varphi_{\sigma,c} \in L^2(R)$ являются вещественными и колеблются вокруг оси абсцисс. Они определены на некотором интервале. Данные функции называются вейвелетами и могут рассматриваться как масштабируемые и сдвинутые версии материнской функции $\varphi(x)$. Параметр c показывает смещение во времени, а σ - параметр масштаба. Большое значение σ соответствует низким частотам, малые – высоким. Множитель $\sigma^{-1/2}$ является нормирующим в L^2 -пространстве, другими словами если материнский вейвлет имел норму равную 1. Операция умножения на окно содержится как бы в самой базисной функции, которая позволяет сужать и расширять это окно. Отсюда появляется возможность адаптивного выбора параметров окна для соответствующего сигнала.

2. Вейвлет-нейронной сети

Вейвлет-нейронные сети являются нейронными сетями с прямой передачей данных с одним скрытым слое, где в качестве базисных функций используются семейства ортонормированных вейвелетов. Вейвлет-нейронные сети сочетают в себе нейронные сети с прямой передачей данных и аппарат основанны на вейвлет-декомпозиции. Основная идея вейвлет-декомпозиции состоит в разложении сигнала $f(x) \in L^2(R^n)$ в ряд функций, зависящих от растяжений смещений материнского вейвелета. Эти функции в таком случае представляют нейронные сети типа персе трон. В большинстве работ по вейвлет-нейронным сетям в качестве активационных функций используют простейшие типы вейвелетов, таким образом используя малую часть преимуществ теории вейвелетов.

Свойства таких вейвлет-нейронных сетей определяется активизационными вейвлет-функциями, которые состоят из сдвигов и растяжений материнского вейвлета. Преимуществами вейвлет-функций является то, что они имеют вид, локализованный во времени(или пространстве) волновых пакетов с нулевым затягиванием интеграла, обладают возможностью сдвига во времени, способны к масштабированию(сжатию-растяжению), а также имеют локальный частотный спектр [4,10,11].

Аппроксимируемый сигнал \hat{y} вейвлет-нейронной сети может быть формально представлен

$$\hat{y}(t) = u(t) \sum_{k=1}^K w_k h_{a_k, b_k}(t) \quad (3)$$

Структура вейвлет-нейронной сети, используемой в данной работе для построения модели временного ряда, представлена на рисунке 1.

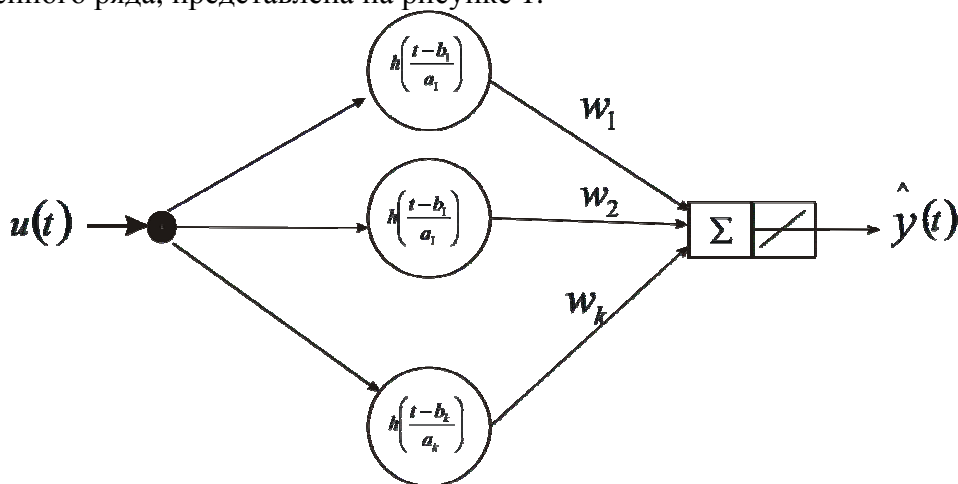


Рис. 1. Структура вейвлет-нейронной сети

Параметры нейронной сети w_k , a_k , и b_k (вес, масштаб и сдвиг по временной оси) являются настраиваемыми параметрами которые необходимо оптимизировать, свертывая функцию стоимости или функцию энергии, E , на исследуемый временной промежуток t . Таким образом, что

$$e(t) = y(t) - \hat{y}(t), \quad (4)$$

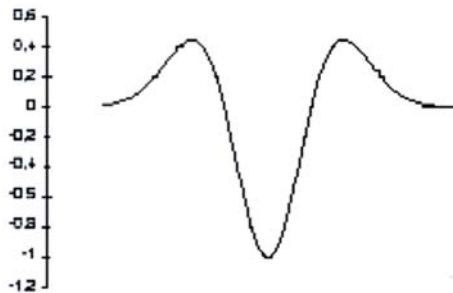
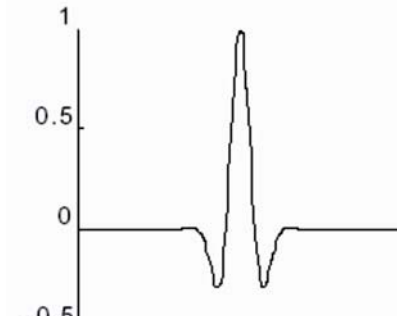
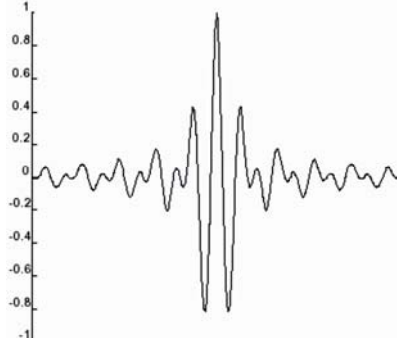
которое является переменной от ошибки функции времени t , где $y(t)$ является целевой функцией. Функция энергии определяется как

$$E = \frac{1}{2} \sum_{t=1}^T e^2(t) \quad (5)$$

В качестве параметров вейвлета используется его масштаб и сдвиг по временной оси. В представленной работе рассматривается сеть, использующая один тип вейвлета, а именно вейвлет «Мексиканская шляпа» (рис. 2), аналитическое выражение которого выглядит так:

В качестве материнских вей вейвлетов использовались, вей влеты «Мексиканская шляпа», «Морлета» и «Шеннона».

Для настройки параметров вейвлет сетей, наиболее широкое распространение получили методы, минимизирующие критерий обучения, связанный, с квадратами рассогласований между внешним обучающим сигналом $d_j[k]$ и выходом сети $\hat{y}_j(k)$.

Используемые вейвлеты		
Имя вейвлета	Определение	Графическое представление
Мексиканская шляпа	$\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\pi^{-\frac{1}{4}}\right)(1-x^2)e^{-\frac{x^2}{2}}$	
Морлет	$\cos(\omega_0\tau)\exp(-0.5\tau^2)$	
Шеннон	$\frac{\sin 2\pi\tau - \sin \pi\tau}{\pi\tau}$	

Простейшей из этих процедур является алгоритм Уидроу-Хоффа, минимизирующий при каждом такте локальный критерий

$$E_j(k) = \frac{1}{2} \left(d_j(k) - \hat{y}_j(k) \right)^2 = \frac{1}{2} e_j^2(k) \quad (6)$$

Обладая высоким быстродействием, а следовательно и выраженными следящими свойствами, эта процедура плохо работает в условиях помех, искажающих обрабатываемые сигналы, в связи с чем при работе со стохастическими процессами чаще всего применяется метод наименьших квадратов.

Процедуры, связанные с методом наименьших квадратов, минимизируют критерий (7):

$$E_j^k = \sum_{p=1}^k E_j(p) = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^k e^2(p), \quad (7)$$

заданный на всей обучающей выборке и фактически обеспечивают решение системы нормальных уравнений.

Несмотря на положительные свойства описанных подходов обучения вейвлет-нейронных сетей, открытым остается вопрос выбора топологии (количество нейронов внутреннего слоя) вейвлет-нейронной сети. На практике это относится к чисто эмпирической процедуре. Хотя, учитывая рассмотренные свойства вейвлетов (сжатие и растяжения) количество вейвлет-нейронов в вейвлет-нейронной сети оказывает прямое влияние на качество аппроксимации стохастического сигнала.

В качестве функции активации выходного слоя исполу зовалась линейная функция активации:

$$f(Z) = Kz \quad (8)$$

$$K = const$$

Для решения данной проблемы нами предложено использовать алгоритм клонального отбора, который является одним из алгоритмов искусственной иммунной системы.

3. Применение искусственной иммунной системы

Искусственные иммунные системы [5,6] представляют собой методику решения задач, основанную на биологических принципах естественных иммунных систем позвоночных животных и человека. ИИС преимущественно используются для решения двух больших классов задач: оптимизации и распознавания. Как и естественные иммунные системы, ИИС используют модель распознавания чужеродных структур (антигенов) специальными рецепторами – антителами. Существует несколько разновидностей ИИС. В данной работе используется ИИС, основанная на принципах клонального отбора, реализованная в виде алгоритма клонального отбора (CLONALG), детальное описание которого приведено в [7]. Очевидно, что ИИС представляет собой идеализированный вариант ее естественного аналога, и воспроизводит лишь ключевые составляющие природного процесса. Этими составляющими являются: отбор лучших антител популяции в зависимости от степени их афинности антигену, клонирование антител, гипермутация и редактирование рецептора. С точки зрения ИИС, каждое антитело представляет собой один вариант решения задачи, закодированный в виде строки бит или символов. Способ кодирования антител зависит от структуры задачи и ее принадлежности к той или иной предметной области. Кроме того, от типа задачи, также, зависит и способ оценки антител, т.е. вид функции афинности. Разработка лишь этих двух составляющих дает возможность полностью адаптировать ИИС для решения задач в выбранной предметной области.

Отличительной чертой алгоритма клонального отбора и преимущество его перед генетическими алгоритмами, является его способность избегать локальные минимумы, что обусловлено действием операторов замещения и гипермутации. Операторы замещения в иммунной системы связаны с понятием иммунной метадинамики, который также носит название *механизма иммунного пополнения* и позволяет осуществлять отбор новых элементов согласно общему состоянию системы, что означает, чувствительность системы к этому новому элементу. Данная чувствительность обычно измеряется аффинностью, которую имеет этот элемент с действительно уже существующими элементами.

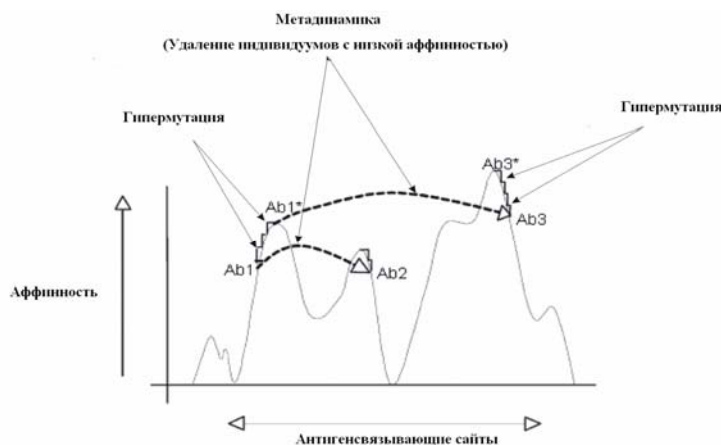


Рис. 2 Гипотетическое изображение поиска в пространстве аффинности

Формально алгоритм клональной селекции можно представить следующим образом:

$$CLONALG = (P^l, G^k, l, k, m_{Ab}, \delta, f, I, \tau, AG, AB, S, C, M, n, d), \quad (9)$$

где P^l – пространство поиска (пространство форм); G^k – представление пространства; l – длина вектора атрибутов (размерность пространства поиска); k – длина рецептора антитела; m_{Ab} – размер популяции антител; δ – функция экспрессии; f – функция аффинности; I – функция инициализации начальной популяции антител; τ – условие завершения работы алгоритма; AG – подмножество антигенов; AB – популяция антител; S – оператор селекции; C – оператор клонирования; M – оператор мутации; n – количество лучших антител, отбираемых для клонирования; d – количество худших антител, подлежащих замене новыми.

Рассмотрим пространство форм (P^l) фенотипов и пространство их представлений в виде антител (G^k) или пространство генотипов. Функция

$$\delta: P^l \rightarrow G^k \quad (10)$$

является функцией преобразования вариантов решений из P^l в их внутренние представления (G^k) в виде индивидуумов популяции. Эта функция иначе называется функцией экспрессии. Предполагается, также, что для каждого решения $p \in P^l$ существует одно и только одно его представление $\delta(p) \in G^k$. При этом в общем случае обратное утверждение неверно. Используя обобщенное представление, можно ввести функцию аффинности f :

$$f: P^l \times P^l \rightarrow \mathfrak{R}^+. \quad (11)$$

При этом задача состоит в максимизации функции аффинности.

Принимая начальный размер популяции антител (m_{Ab}), можно ввести функцию инициализации в виде:

$$I: G^k \times m_{Ab} \rightarrow AB(G^k). \quad (12)$$

Часто инициализация производится случайным образом с использованием равномерного распределения.

Пусть Q – унарный стохастический оператор преобразования на множестве G^k , который использует управляющее множество K_Q для генерации управляющих параметров, определяющих способ преобразования на текущем шаге работы алгоритма. Следовательно, функциональная запись оператора Q может быть представлена так:

$$Q: G^k \times K_Q \rightarrow G^k. \quad (13)$$

Оптимальным решением $Ab_{opt} \in G^k$ относительно оператора Q и антигена $Ag \in AG$, $AG \subset G^k$ называется индивидуум, чья аффинность не может быть увеличена при дальнейшем воздействии оператора преобразования Q , т.е.

$$\forall k \in K_Q: f(Q(Ab_{opt}, k), Ag) \leq f(Ab_{opt}, Ag). \quad (14)$$

Условие останова (τ) выполняется когда популяция антител полностью распознает популяцию антигенов, т.е.

$$\forall Ag \in AG: \exists Ab \in G^k \mid Ab = Ab_{opt}. \quad (15)$$

Оператор селекции S формирует подмножество G_S индивидуумов, чья аффинность является лучшей в данном поколении. Таким образом, S совместно с управляющим множеством K_S представляет функцию:

$$S: G^k \times K_S \rightarrow \{0, 1\}, \quad (16)$$

множество, которое образуется в результате селекции:

$$G_S = \{Ab \in G^k \mid S(Ab, k_S) = 1\}, \quad |G_S| = n. \quad (17)$$

Аналогично производится отбор индивидуумов в популяцию клеток памяти.

Оператор клонирования C увеличивает представительство элементов множества G_S в популяции и совместно с управляющим множеством K_C может быть записан так:

$$C : G_S \times K_C \rightarrow G_S. \quad (18)$$

Оператор мутации M с управляющим множеством K_M :

$$M : G^k \times K_M \rightarrow G^k. \quad (19)$$

Метадинамика системы выражена в виде функции замещения худших антител популяции:

$$R : G^k \times d \rightarrow AB_d(G^k). \quad (20)$$

Худшие антитела предварительно отбираются при помощи оператора селекции.

Ниже приводится обобщенное пошаговое описание алгоритма.

Шаг 1. *Инициализация.* Создание (обычно случайной генерацией) начальной популяции антител (AB).

Шаг 2. *Вычисление аффинности.* Для каждого антитела Ab_j , $Ab_j \in AB$ вычислить его аффинность по отношению к каждому антигену Ag_i , $Ag_i \in AG$. Результаты записать в матрицу аффинностей $D : D = [|AG| \times m_{Ab}]$ и $d_{ij} = f(Ab_j, Ag_i)$, $d_{ij} \in D$.

Шаг 3. *Клональная селекция и распространение.* Выбрать из популяции по n лучших антител для каждой строки матрицы D , и поместить их в отдельную популяцию клонов AB_C , $|AB_C| = n \cdot |AG|$. Генерировать клоны элементов популяции AB_C пропорционально их аффинности, т.е. чем выше аффинность, тем большее количество клонов создается и наоборот.

Шаг 4. *Созревание аффинности.* Подвергнуть мутации все клоны популяции AB_C с вероятностью обратно-пропорциональной их аффинностям, т.е. чем ниже аффинность индивидуума, тем выше вероятность его мутации. Вычислить новую аффинность каждого антитела Ab_j , $Ab_j \in AB_C$ аналогично п.2, получив матрицу аффинностей D_C . Выбрать из популяции AB_C n антител, для которых соответствующий вектор-столбец матрицы D_C дает лучший обобщенный результат аффинности, и перенести их в популяцию клеток памяти M_R .

Шаг 5. *Метадинамика.* Заменить d худших антител популяции AB новыми случайными индивидуумами.

Шаг 6. Заменить n антител популяции AB клетками памяти из M_R и перейти к п.2 пока не будет достигнут критерий останова.

Особенностью алгоритма клональной селекции является то, что он, в отличие от иммунной сети, поддерживает постоянный размер популяции антител.

В представленной работе ИИС используется для оптимизации параметров вейвлет-нейронной сети, следовательно, каждое антитело должно содержать в себе информацию о структуре и значениях параметров для одного варианта вейвлет-нейронной сети. Структура антитела, разработанной ИИС представлена на рисунке 3.

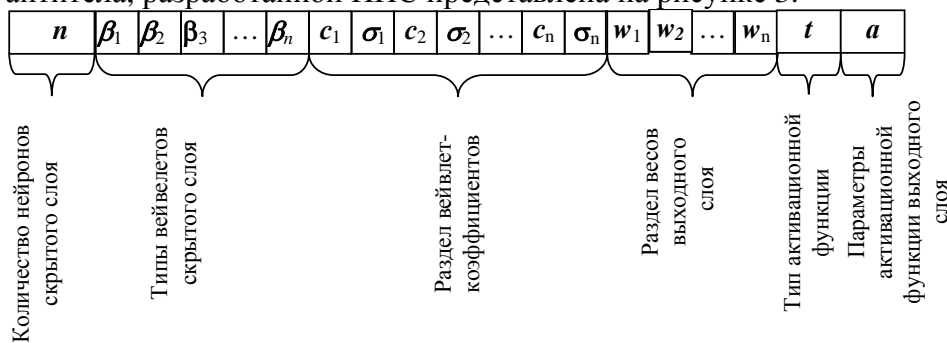


Рис. 3 Структура антитела ИИС

Антитело состоит из семи частей. Первая часть представляет собой стоку определяющая максимальное число выбранных нейронов, кодирующую структуру скрытого слоя вейвлет-нейронной сети. Раздел вейвлет-коэффициентов содержит значения масштабов и временных сдвигов соответствующих вейвлетов, раздел весов выходного слоя определяет значение весов выходного слоя, пятая часть содержит тип активизационной функции и в самом конце строки находится раздел параметров активизационной функции выходного слоя.

Для оценки антитела, клональный алгоритм воспроизводит соответствующий его структуре вариант вейвлет-нейронной сети и рассчитывает среднеквадратическую ошибку спрогнозированной сетью и реальных значений временного ряда на обучающей выборке данных. Эта ошибка становится мерой аффинности соответствующего антитела популяции.

4. Экспериментальные исследования

Проведён компьютерный эксперимент. Для моделирования были сгенерированы двумерный массив, содержащий воздействие на оператора и реакция оператора на воздействия. Необходимо по реакции оператора определить величину воздействия.

Тренировочная выборка состояла из 11315 измерений, тестовая из 10382 измерений.

В качестве постоянных параметров настройки использовались:

Условие останова 100 поколений

- % отбора лучших индивидуумов из популяции 0,7
- Общий уровень мутации 0,8
- Жесткость отбора (селективное давление) 20

В качестве изменяемых параметров:

- Размер основной популяции индивидуумов 50, 100, 300
- Размер популяции клонов 25, 300
- Максимальное количество нейронов верхнего слоя: 52, 78, 156.

Оценка и выбор полученных моделей оценивалась с помощью множества статистических параметров. Они разрешают оценить в отдельности значимость, определить интегральную погрешность модели относительно исходных данных, установить наличие корреляции между значениями ошибки модели, а также определить степень адекватности модели физическому процессу в целом. В это множество входят такие статистические параметры:

1. Коэффициент детерминации R^2 . Мерой информативности временного ряда часто используют его дисперсию. Коэффициент R^2 - это отношения дисперсии той части временного ряда основной переменной, что описывается полученным уравнением, к выборочной дисперсии этой переменной. Он исчисляется по формуле: $R^2 = \frac{\widehat{\text{var}}(a)}{\text{var}(y)}$.

Очевидно, что для адекватной модели коэффициент детерминации должен направляться к единице, то есть: $R^2 \rightarrow 1$.

2. Сумма квадратов ошибок модели $\sum e^2(k)$, то является $SSE = \sum_{k=1}^N [\widehat{y}(k) - y(k)]^2$, где $\widehat{y}(k) = \widehat{a}_0 + \widehat{a}_1 \widehat{y}(k-1) + \widehat{a}_2 \widehat{y}(k-2) + \widehat{b}_1 x(k) + \widehat{b}_2 z(k)$;

$y(k)$ – измерения; N – длина выборки. Очевидно, что из возможных кандидатов необходимо выбирать ту модель, для которой $\sum e^2(k)$ принимает минимальное значение.

Статистика Фишера F , что определяет степень адекватности модели в целом. Для адекватной модели выполняется условие: $F > F_{крит}$, где $F_{крит}$ определяется по таблице аналогично t – статистике. Значение F пропорционально $R^2 / (1 - R^2)$, где R^2 – коэффициент детерминации. Таким образом, большему значению F отвечает более адекватная модель.

Среднеквадратическая ошибка, определяет точность прогноза и рассчитывает

точность прогноза по формуле: $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_t \left(\hat{y}_t - y_t \right)^2}{N}}$, где \hat{y}_t – вычисленное значение, y_t – фактическое значение, N – объем выборки.

Критерий Колмогорова-Смирнова – одновыборочный критерий нормальности, основан на максимуме разности между кумулятивным распределением выборки и предполагаемым кумулятивным распределением. Применени данного критерия обусловлено тем, что, остатки e_i должны бать независимми нормально распределенными случайными величинами с нулевым средним. Статистика критерия – абсолютная величина разности эмпирической $F^*(x)$ и теоретической $F(x)$ функций распределения:

Находится наибольшая разность между эмпирической $F^*(x)$ и теоретической $F(x)$ функциями распределения: $D = \max |F(x_i) - F^*(x_i)| \quad (i=1,2,\dots,k)$.

Находится величина $\lambda = D\sqrt{n}$ по таблице находится вероятность $p(\lambda)$ того, что расхождение D между $F(x)$ и $F^*(x)$ носит случайный характер. Если эта вероятность велика, то нет оснований, считать, что гипотеза о законе распределения несправедлива, если же $p(\lambda)$ мала (обычно меньше 0,1), то нулевая гипотеза нуждается в дополнительной проверке, так как есть основания считать, что распределение величины X не описывается удовлетворительно выбранной функцией. В зависимости от выдвинутой (так называемой нулевой) гипотезы подсчитывают значения эмпирических квантилей z_i для **правых** значений интервалов x_i . Затем по находятя значения функции нормального распределения $F(z)$, представляющие вероятность того, что наблюдаемое значение x будет меньше правого конца x_i интервала с номером i .

Далее, согласно критерию Колмогорова, находится наибольшая разность D и затем – λ . По таблице . 1 оценивается вероятность справедливости нулевой гипотезы. Если статистика Колмогорова-Смирнова значима, то гипотеза о том, что соответствующее распределение нормально, должна быть отвергнута, т.е. если D статистика Колмогорова-Смирнова значима, то гипотеза о том, что соответствующее распределение нормально, должна быть отвергнута. Для проведения эксперимента использовалась компьютерная программа, в которой моделируется текущее положение объекта слежения (цели) и фиксируются текущие координаты положения курсора манипулятора «мышь» и ошибки оператора при слежении оператора за целью с помощью мыши.

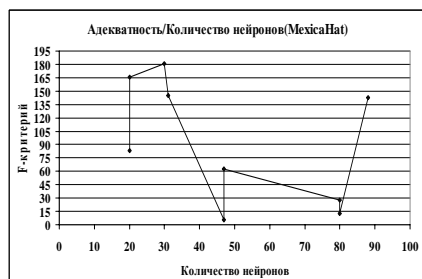
Точность полученных моделей вейвлет нейронных сетей при различных вейвелетах, количестве нейронов, заданных параметрах настройки объема популяции и максимальном количестве клонов

Тип вейвлета	Верхний допустимый максимум количества нейронов	Фактическое количество нейронов	Отношение: Популяция/К-во клонов	RMSE
MexicaHat	52	30	50/300	0,020
MexicaHat	78	31	50/300	0,019
MexicaHat	156	88	50/300	0,032
MexicaHat	52	20	300/300	0,022
MexicaHat	78	47	300/300	0,091
MexicaHat	156	80	300/300	0,042
MexicaHat	52	20	100/25	0,016
MexicaHat	78	47	100/25	0,024
MexicaHat	156	80	100/25	0,074
Morlet	52	29	50/300	0,035
Morlet	78	40	50/300	0,028
Morlet	156	76	50/300	0,028
Morlet	52	27	300/300	0,051
Morlet	78	43	300/300	0,077
Morlet	156	84	300/300	0,103
Morlet	52	27	100/25	0,050
Morlet	78	43	100/25	0,049
Morlet	156	84	100/25	0,115
Shennon	52	25	50/300	0,020
Shennon	78	36	50/300	0,054
Shennon	156	69	50/300	0,045
Shennon	52	24	300/300	0,100
Shennon	78	26	300/300	0,086
Shennon	156	82	300/300	0,234
Shennon	52	24	100/25	0,145
Shennon	78	26	100/25	0,261
Shennon	156	82	100/25	0,243

Получена оценка ожидаемой эффективности разработанной методики нейросетевой компенсации ошибок слежения. В качестве показателя эффективности принята среднеквадратическая ошибка слежения. Анализ результатов эксперимента показал, что использование нейросетевой компенсации на основе вейвлет-сетей позволит уменьшить ошибку слежения в несколько раз.

Анализ остатков и коэффициент детерминации

Тип вейвлета	Фактическое количество нейронов	Колмогорова-Смирнова	p-значение	Сумма квадратов ошибок	Коэффициент детерминац.
MexicaHat	30	0,078	0,010	4,342	0,985
MexicaHat	31	0,056	0,010	3,377	0,998
MexicaHat	88	0,076	0,010	10,698	0,963
MexicaHat	20	0,910	0,010	5,183	0,941
MexicaHat	47	0,021	0,010	86,219	0,995
MexicaHat	80	0,086	0,010	18,285	0,991
MexicaHat	20	0,070	0,010	2,758	0,946
MexicaHat	47	0,088	0,010	6,145	0,994
MexicaHat	80	0,082	0,010	56,809	0,556
Morlet	29	0,102	0,010	12,574	0,915
Morlet	40	0,071	0,010	4,342	0,900
Morlet	76	0,064	0,010	7,995	0,992
Morlet	27	0,061	0,010	26,984	0,990
Morlet	43	0,127	0,010	60,774	0,429
Morlet	84	0,070	0,010	109,191	0,994
Morlet	27	0,142	0,010	26,257	0,988
Morlet	43	0,129	0,010	25,004	0,992
Morlet	84	0,131	0,010	136,940	0,941
Shennon	25	0,103	0,010	4,153	0,975
Shennon	36	0,137	0,010	30,772	0,906
Shennon	69	0,078	0,010	21,372	0,988
Shennon	24	0,108	0,010	102,894	0,908
Shennon	26	0,110	0,010	76,358	0,786
Shennon	82	0,071	0,010	568,241	0,382
Shennon	24	0,138	0,010	216,989	0,645
Shennon	26	0,093	0,010	708,098	0,579
Shennon	82	0,084	0,010	646,148	0,038



а



б



в

Рис. 5 Зависимость адекватности нейросетевой модели от количества нейронов внутреннего слоя при F- критическом 1,033

5. Выводы

В данной работе рассмотрена методика создания и настройки вейвлет-нейронных сетей при помощи искусственных иммунных систем. На базе этой методики разработана программа, которая была протестирована посредством решения задачи компенсации ошибок оператора при слежении за целью на экране монитора с помощью манипулятора. Приведенные в работе примеры показывают высокие результаты тестирования вейвлет-нейронной сети, работающей под управлением ИИС. В качестве направления дальнейших исследований предлагается расширение существующей системы путем добавления других архитектур вейвлет-нейронных сетей, а также проведение сравнительных тестов с рядом разновидностей иммунных алгоритмов.

Models neural wavelet networks for the decision of a problem of indemnification of errors of the operator-tipper-of in a contour of management of system watching the purpose are developed and investigated. Comparative researches of accuracy and adequacy of the received models are carried out.

1. Луизов А.В. Инерция зрения. –М.: Оборонгиз, 1961, 0206с.
2. Луизов А.В., Травникова Н.П. Вероятность обнаружения движущихся объектов. –М.: Светотехника, 1984, с.7-9.
3. Цибулевский И.Е. Человек как звено следящей системы – М.: Наука, 1981. – 288с
4. Daubechies, Ten Lectures on Wavelets, CBMS-NSF Regional Series in Applied Mathematics, SIAM, Philadelphia, (1992).
5. Tarakanov A.O.,Skormin V.A., Sokolova S.P. Immunocomputing: principles and applications, Springer, 2003
6. Burnet F.M. The Clonal Selection Theory of Acquired Immunity. The University Press, Cambridge 1959.
7. De Castro, L. N. & Von Zuben, F. J. (2000a), “The Clonal Selection Algorithm with Engineering Applications”, submitted to GECCO’00.
8. Четырин С.П., Вилор М.Ю. Адаптивный нейросетевой компенсатор ошибок оператора-наводчика при визуальном слежении за целью//Збірник наукових праць Севастопольського військово-морського ордена Червоної зірки інститута ім. П.С.Нахімова. Випуск 1(9), 2006 р. С.151-157
9. Фефелов А.А., Литвиненко В.И. Горавский С.П. Построение и настройка вейвлет нейронных сетей при помощи искусственных иммунных систем// Інтелектуальні системи прийняття рішень та прикладні аспекти інформаційних технологій: Матеріали науково-практичної конференції, Том 5., с.77-80.
10. Bodyanskiy Ye., Lamonova N., Pliss I.,Vynokurova O. An adaptive learning algorithm for a wavelet neural network // Expert Systems. – 2005. – 22. - N. 5 – P.235-240.
11. Lekutai, G., Adaptive Self-Tuning Neuro Wavelet Network Controllers, PhD Thesis,
1. Virginia Polytechnic Institute and State University, The Electrical Engineering Department, 1997.
12. Руденко О.Г., Бодянский Е.В. Основы теории искусственных нейронных сетей. — Харьков: ХЕЛЕТЕХ, 2002.

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ И СИСТЕМАМИ

УДК 519.6:681.3

ОПТИМІЗАЦІЯ ПЛІВКОВОГО АПАРАТУ РОТОРНОГО ТИПУ ЗА МАКСИМАЛЬНОЮ ПРОДУКТИВНІСТЮ

Ладієва Л.Р., Зав'ялова Т.П.

Принципи впровадження енергозберігаючих технологій та одержання якісних продуктів сприяють усталеному розвитку промислового комплексу України.

Випарні установки широко використовуються в різних галузях промисловості: фармацевтичній, хімічній, харчовій, металургійній, целюлозно-паперовій та ін.

У деяких виробництвах такі установки – основна ланка технологічного процесу, що визначає якість і вартість виготовленої продукції. Випарні установки споживають значну кількість енергоресурсів, а їх спорудження й експлуатація потребують значних капітальних і виробничих затрат. Тому велике значення мають проектування випарних установок з високими техніко-економічними показниками, раціоналізація й оптимізація режимів їх роботи у процесі експлуатації.

Вирішення цих завдань пов'язано із застосуванням сучасних комп'ютерних технологій, впровадження яких потребує розроблення відповідного математичного забезпечення. Основа такого забезпечення – математичні моделі випарних установок, які можна використовувати, як на етапі проектування так і в умовах їх експлуатації у складі системи керування.

Насамперед це стосується випарних установок, де використовуються плівкові апарати роторного типу (ПАРТ). Для досягнення цієї мети необхідно знайти область оптимального проведення процесу, що забезпечується відповідними конструктивними параметрами.

Розглянемо пошук оптимального технологічного критерію у випадку, коли плівковий апарат роторного типу займає “вузьке” місце у технологічній схемі. Задача підвищення продуктивності в плівкових апаратах роторного типу здійснюється за рахунок збільшення теплового потоку.

Вибір критерію оптимальності диктується інтересами всієї технологічної лінії виробництва. Найбільш об'єктивним критерієм оптимальності для ПАРТ являється собівартість упареного продукту при заданій концентрації на виході.

Тому в якості критерію керування ПАРТ, коли це в інтересах оптимального керування процесами всієї технологічної лінії виробництв доцільно вибрати технологічний критерій – продуктивність при заданій концентрації вихідного продукту

$$I = S_k \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$\text{при } b_k = b_k^{zd},$$

де S_k - витрати на виході з апарату, кг/с,

b_k - відповідна масова концентрація сухих речовин.

З урахуванням конструктивних особливостей ПАРТ керуючими збуреннями вибрано число обертів ротора n і витрати охолоджуючої води в конденсаторі Gv , що пояснюється намаганням ефективно використовувати плівкові апарати роторного типу за рахунок забезпечення кращих умов теплообміну в ПАРТ, що досягається при зануренні лопатів у шар рідини.

Для математичного опису ПАРТ умовно виділимо в ньому основні елементи: нагрівальну камеру – парову сорочку апарату, поверхню нагріву, парорідинний простір і розглянемо процеси в цих елементах у їх взаємозв'язку.

Рівняння теплового балансу парової сорочки має вигляд:

$$G_p(i_p'' - i_k') - \alpha_{PC} F_{STZ} (\Theta_P - \Theta_{ST}) = 0, \quad (2)$$

де G_p - витрати гріючої пари кг/с, i_p'' - ентальпія гріючої пари, Дж/кг, i_k'' - ентальпія конденсату, Дж/кг, Θ_P - температура гріючої пари, К, α_p - коефіцієнт тепловіддачі від гріючої пари до стінки корпусу апарату Вт/м²град., F_{STZ} - площа зовнішньої поверхні стінки корпусу, м², Θ_{ST} - температура стінки корпусу, К.

Рівняння теплового балансу стінки представимо як:

$$\alpha_p F_{STZ} (\Theta_P - \Theta_{ST}) - \alpha_{PL} F_{STV} (\Theta_{ST} - \Theta_{PL}) = 0, \quad (3)$$

де Θ_{PL} - температура плівки, К, α_{PL} - коефіцієнт тепловіддачі від стінки корпусу до плівки Вт/м²град, F_{STV} - площа внутрішньої поверхні стінки корпусу м².

Для визначення коефіцієнту тепловіддачі від стінки корпусу до плівки розглянемо деякі аспекти теплообміну в плівкових роторних апаратах.

Інтенсивність процесів тепло- і масообміну в тонких шарах залежить від густини зрошення (товщини плівки) і від ступеня турбулізації її течії. При деяких критичних значеннях телового потоку, густини зрошення та кількості обертів ротора залежність α_{PL} від цих факторів набуває доволі складного характеру, що пов'язано з гідродинамікою процесу, та умовами впливу лопастей на плівку.

При стіканні тонкої плівки рідини по поверхні її товщина визначає гідродинаміку течії, її тепло- і масообмін. Зокрема занадто товстий шар рідини зменшує коефіцієнт тепловіддачі випарюваної речовини. Якщо ж плівка занадто тонка – підвищується ймовірність появи “прогалин” (ділянок не покритих шаром рідини).

Змочуваність поверхні нагрівання, що визначає інтенсивність тепловіддачі, залежить від числа обертів ротора.. При малих числах обертів (низькі лінійні швидкості лопатів ротора) розподіл плівки рідини по поверхні нерівномірний і остання використовується неефективно. Рівномірне змочування (при постійній густині зрошення) може бути досягнуте за рахунок зміни числа обертів. Збільшення лінійної швидкості руху лопатів ротора приводить до деякого згладжування напливної хвилі рідини перед лопатом і більш рівномірного розподілу шару по поверхні. Початковий період обертання, можна ототожити з ділянкою гідродинамічної стабілізації, характерним для гравітаційного стікання плівки. Тут можна чекати знижених значень коефіцієнтів тепловіддачі внаслідок нерівномірного і неповного змочування поверхні. Підвищення α_{PL} повинне спостерігатися при досягненні визначеного числа обертів, що забезпечує повне змочування.

Мінімальну густину зрошення для турбулентного руху плівки знаходимо з критеріальної залежності:

$$\Gamma_{\min} = 0.09 \cdot v_{PL} \cdot We^{1.18} \cdot Fr^{-0.23} (1 - \cos(\theta))^{0.642} z^{-0.21} \left(\frac{\Delta}{2}\right)^{0.125}, \quad (4)$$

де $We = \frac{\sigma_{PL}}{\rho_{PL} \cdot g \cdot \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{v_{PL}^2}{g}\right)^{\frac{2}{3}}}$ - критерій Вебера,

$Fr = (2\pi n)^2 \frac{d_{ro}}{2g}$ - критерій Фруда.

На рисунку1 зображена крива, відображаюча аналітичну залежність мінімальної густини зрошення від числа обертів ротора.

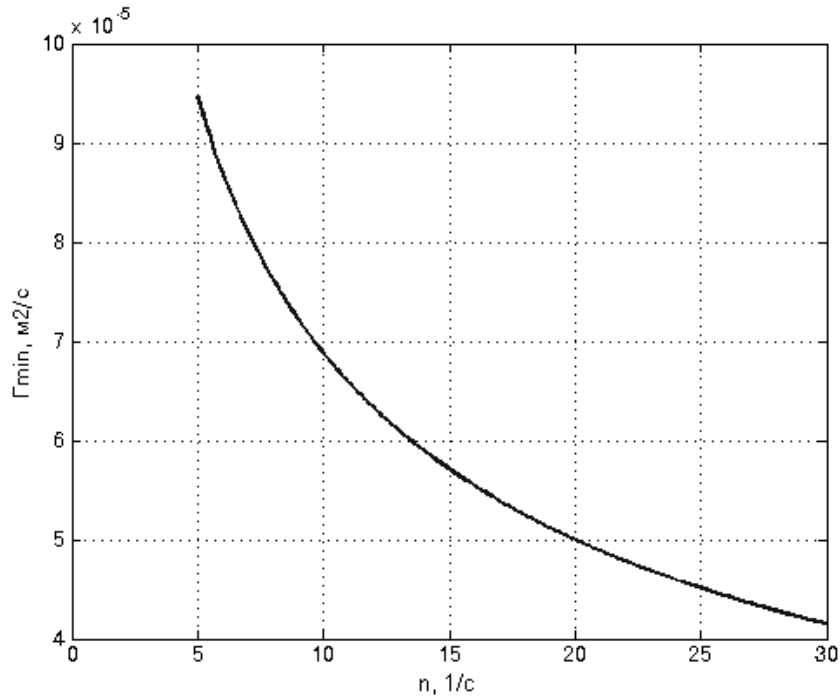


Рис. 1 Залежність мінімальної густини зрошення від числа обертів ротора ($z=2$)

В рівнянні теплового балансу для плівки рідини, окрім теплоти, переданої від гриночої пари, враховувалось тепло підведене за рахунок енергії дисипації, котра залежить від потужності, що визначається на перемішування:

$$S_o c_o \Theta_o + \alpha_{PL} F_{STV} (\Theta_{ST} - \Theta_{PL}) + LN - Wr_p - S_k c_k \Theta_{PL} = 0, \quad (5)$$

де S_o - витрата вихідної рідини кг/с, c_o - питома теплоємність вихідної рідини Дж/кг град., Θ_o - температура вихідної рідини, К, $L = \frac{z}{H}$ - розмірний коефіцієнт, N - потужність, витрачена на перемішування Вт, W - кількість вологи, що випаровується кг/с, r_p - питома теплота пароутворення, Дж/кг, S_k - витрата рідини на виході з апарату кг/с, c_k - питома теплоємність рідини на виході з апарату Дж/кг град.

Рівняння теплового балансу конденсатора представлені:

$$\begin{aligned} Wr_p - K_T F_K (\Theta_2 - \Theta_{b_2}) &= 0, \\ K_T F_K (\Theta_2 - \Theta_{v_2}) + G_v c_v (\Theta_{v_1} - \Theta_{v_2}) &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

де K_T - коефіцієнт тепловіддачі від вторинної пари до охолоджувальної води, Вт/м²град, F_K - поверхня теплообміну конденсатора, м², Θ_2 - температура вторинної пари, К, $\Theta_{v_1}, \Theta_{v_2}$ - температура охолоджувальної води на вході і виході з конденсатора відповідно, К, G_v - витрати охолоджувальної води, кг/с, c_v - теплоємність охолоджувальної води, Дж/кг град.

Рівняння матеріального балансу ПАРТ за абсолютно сухої речовини логічно записати:

$$S_o b_o - S_k b_k = 0, \quad (7)$$

де $S_k = S_o - W$.

Враховуючи вищезазначені керуючі збурення, число обертів ротора n і витрати холодної води G_v , розв'язано систему рівнянь математичної моделі (2), (3), (5), (6) та (7) та отримано поверхні характеризуючі зміну коефіцієнту масовіддачі (рисунку 2) та витрати продукту на виході (рисунку 3).

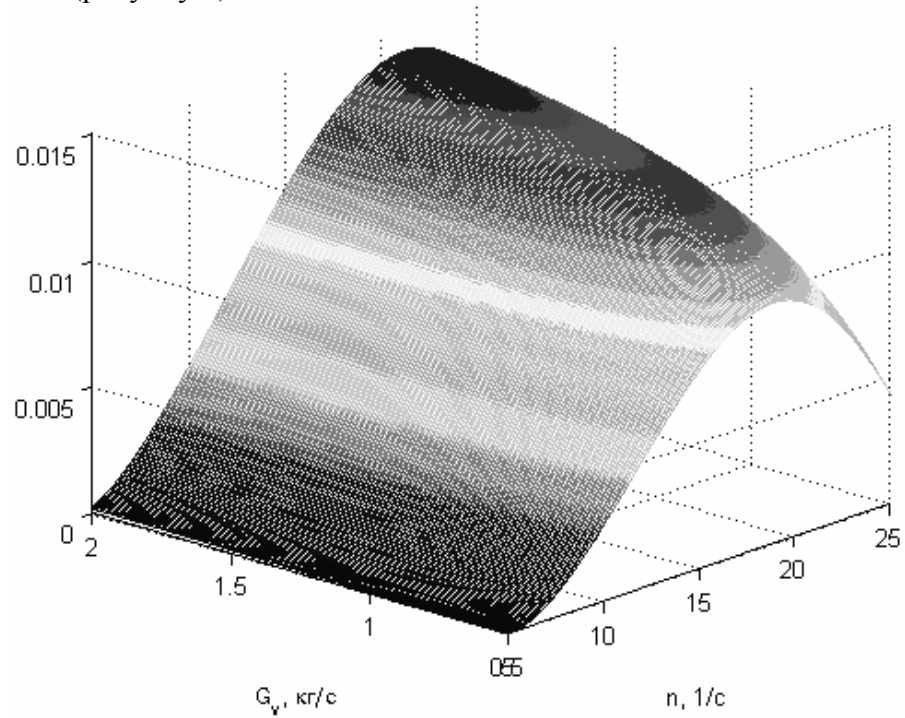


Рис. 2 Залежність коефіцієнту масовіддачі в апараті від числа обертів ротора та витрати охолоджуючої води ($z=2$)

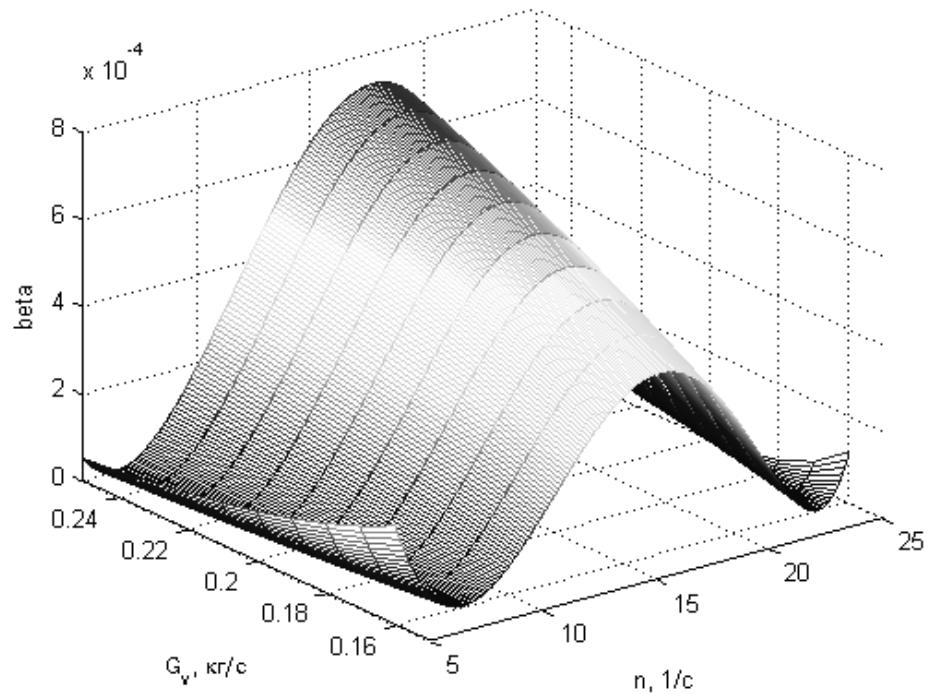


Рис. 3 Залежність витрати продукту на виході з апарату від числа обертів ротора та витрати охолоджуючої води ($z=2$)

На рисунку 4 зображено результати розв'язку рівнянь математичної моделі для різних конструктивних параметрів.

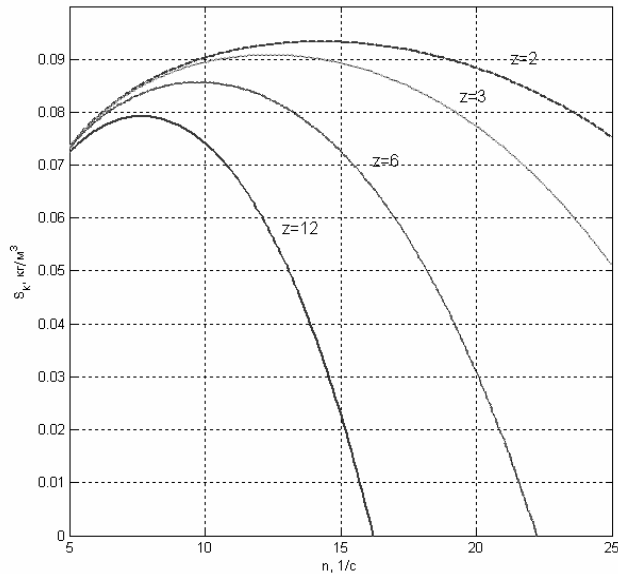


Рис. 4 Залежність витрати продукту на виході з апарату від числа обертів ротора при різних кількостях лопатів ротора ПАРТ

Границі зміни швидкості обертання ротора вибрані 5,83 – 25 об/с. На витрати холодної води також накладені обмеження, пов'язані з нормальним функціонуванням ПАРТ в режимі випаровування та з пропускнуою здатністю обладнання.

З урахуванням обмежень, що накладаються на керуючі збурення і пов'язаних з ефективним використанням і можливостями технологічного обладнання, задача оптимізації технологічного режиму роботи ПАРТ (1) може бути представлена таким чином:

$$I = S_k \rightarrow \max, \tag{8}$$

$$b_k = b_k^{zd}, n_{\min} \leq n \leq n_{\max}, G_{v \min} \leq G_v \leq G_{v \max}$$

Математична модель статичного процесу випаровування в ПАРТ має складну структуру, що значно ускладнює пошук оптимуму цільової функції, застосовуючі класичні методи оптимізації. Використання методів, які базуються на основі еволюційних обчислень, а саме генетичних алгоритмів, значно спрощує пошук оптимуму.

Генетичні алгоритми являють собою алгоритми пошуку, засновані на принципах, схожих на принципи природнього відбору та генетики. В загальному випадку вони поєднують у собі принцип виживання найперспективніших особин-рішень та структурований випадково-детермінований обмін інформацією, в якому присутній елемент випадковості, моделюючий природні процеси спадковості та мутації.

Виділимо п'ять основних відмінностей генетичних алгоритмів від традиційних: генетичні алгоритми працюють з кодами, в яких представлено набір параметрів, які напряму залежать від аргументів цільової функції; для пошуку генетичний алгоритм використовує декілька точок пошукового простору одночасно, тобто оперує одразу з усією сукупністю можливих значень; генетичний алгоритм в процесі роботи не використовує додаткових значень, що дозволяє значно прискорити розрахунки; генетичний алгоритм використовує як ймовірнісні правила для знаходження нових точок пошуку, так і детерміновані для переходу від одних точок до інших; генетичні алгоритми використовують одну й ту ж стратегію для пошуку оптимуму як для унімодальних так й для багатоекстремальних функцій.

Генетичний алгоритм оперує кодовими послідовностями – кодами невідносно до їхньої смислової інтерпретації. Кожна кодова послідовність являє собою точку простору пошуку.

На кожному кроці роботи генетичний алгоритм використовує декілька точок пошуку одночасно. Сукупність цих послідовностей являється набором кодових послідовнос-

тей (особин), котрі формують вихідну множину рішень (популяцію). Кількість осіб в популяції – розмір популяції.

Загальна структурна схема генетичного алгоритму представлена на рисунку 5

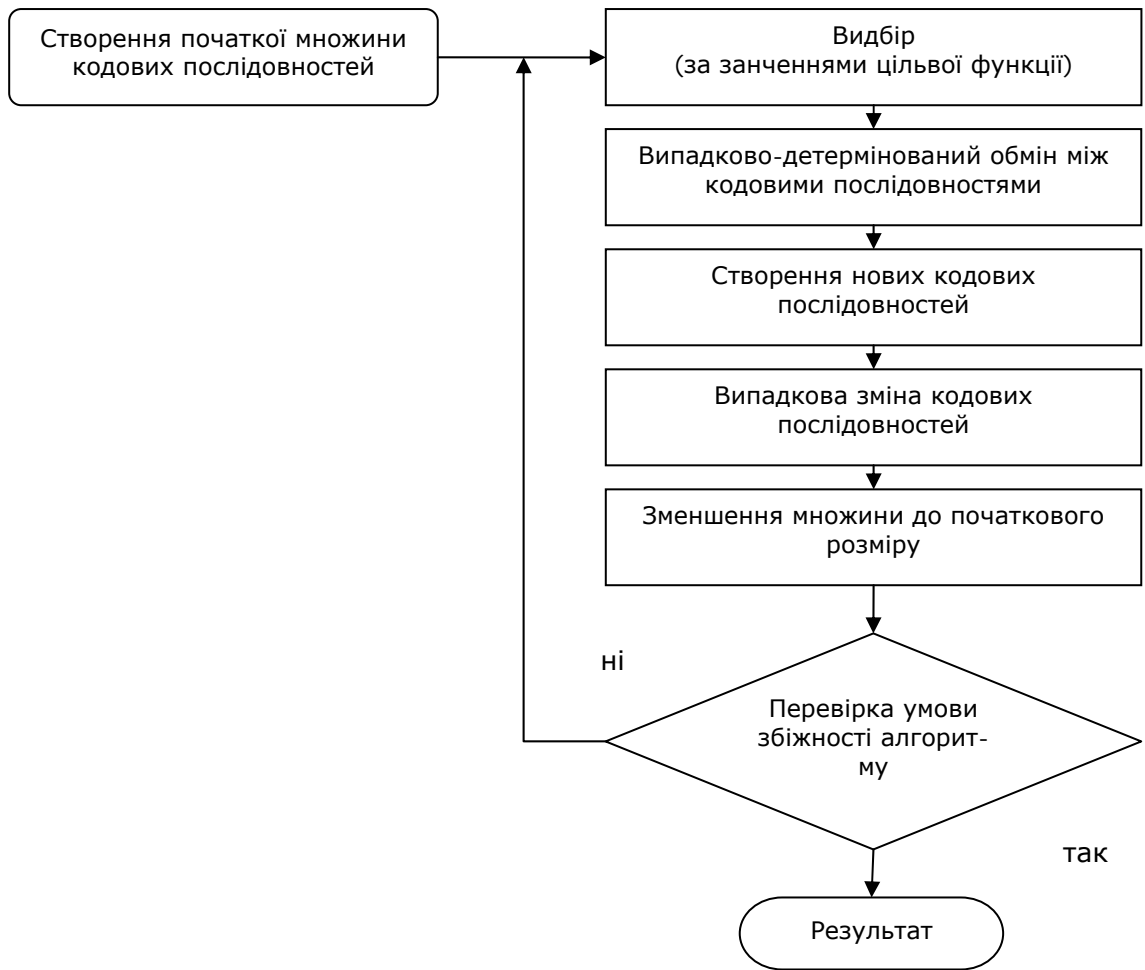


Рис. 5 Структура генетичного алгоритму

Розглянемо роботу генетичного алгоритму. Формування вихідної популяції K використовується з використанням будь-якого випадкового закону розподілу, наприклад, рівномірного, на основі якого й відбувається вибір деякого числа точок пошукового простору.

В основі оператора відбору, котрий служить для вибору батьківських пар та знищення неперспективних особин, лежить принцип «виживає сильніший».

Ймовірність участі i -тої послідовності в процесі обміну обчислюється за формулою:

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^k f_j}, \quad (9)$$

де k - розмір вихідної множини, i - номер кодової послідовності, f_i - значення цільової функції для i -тої послідовності.

Як результат роботи алгоритму відбираються найперспективніші особи (еволюція до локально-оптимального рішення).

Робота алгоритму припиняється в випадку виконання однієї з умов зупинки алгоритму: сформовано задане число поколінь, популяція досягла заданого рівня якості, досягнуто певного рівня збіжності, при котрому покращення популяції вже не відбувається.

Після роботи генетичного алгоритму з кінцевої популяції обирається та особина, що дає мінімальне (максимальне) значення цільової функції та являється, в результаті результатом роботи генетичного алгоритму.

Для визначення мінімуму цільової функції S_k визначимо деякі характеристики генетичного алгоритму наведені в таблиці 1.

Таблица 1

Характеристики генетичного алгоритму

Характеристика	Значення
Розмір популяції	20
Початкові значення кодових послідовностей в діапазоні	1..20
Закон формування вихідної популяції	нормальний

В таблиці 2 наведено результати відпрацювання алгоритму. Задачу розв'язано для різних конструктивних параметрів.

Таблица 2

Результати роботи алгоритму

Кількість генерацій	Z	$G_v, \frac{к\mathcal{E}}{с}$	$n^{opt}, \frac{1}{с}$	$S_k, \frac{к\mathcal{E}}{с}$	b_k
135	12	0,16	8,13549	0,07835	0,06
146	6	0,17	10,6455	0,08678	0,06
120	6	0,2	10,7116	0,08836	0,06
150	3	0,2	13,4106	0,09202	0,06
150	2	0,2	15,3572	0,09385	0,06

Отже варіюючи кількість обертів ротора ПАРТ можливо підвищити продуктивність апарату, регулюючи концентрацію на виході зміною витрати охолоджуваної води. При чому слід враховувати, що для апаратів з більшою кількістю лопатів число обертів, при якому досягається оптимальний режим роботи менше.

In this article we describe scopes of use rotary film evaporators and problems concerned with significant part of power inputs that emerge when we use evaporators. For problem-solving we pose a problem to optimize technological and construction activity attributes. As feasible solution we offer to choose production of output stream like criterion of optimality when value of concentration is given. Accepted control action is swiftness of rotor and intensity of cool water flow at the point of entry of barometric steam condenser. We discuss factors that influencing at heat emission in evaporators. For parameters determination we use optimization methods based on genetic algorithms. The results of finding technological mode of operation in which we can get maximal productivity are presented here. Also the guidelines according selection of the best mode of operation when construction solutions are different are given in this article.

1. Ладієва Л.Р., Оптимізація технологічних процесів// Політехніка, Київ. – 2004 – 192 ст.
2. Воронцов Е.Г., Тананайко Ю.М., Теплообмен в жидкостных пленках// Техника, Киев, - 1972 – 194 ст.
3. Жученко А.І., Математичне моделювання випарних установок// Політехніка, Київ. – 2004 – 144 ст.
4. Назаров А.В., Лоскутов А.И., Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации систем// Наука и техника, Санкт-Петербург, - 2003 – 384 ст.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ І ГРАНУЛОУТВОРЕННЯ В АПАРАТІ ПСЕВДОЗРІДЖЕНОГО ШАРУ

Корнієнко Б.Я., Снігур О.В.

Вступ

Розглядається проведення процесу з отриманням продукту постійного гранулометричного складу без зовнішнього рециклу. Представлені результати статичної оптимізації процесу зневоднення і гранулювання водних розчинів сульфата амонію.

Експериментальні дослідження проведені на лабораторній установці, корпус гранулятора у формі паралелепіпеда 0,11x0,29x1,3 м. Для введення рідкої фази всередині псевдозрідженого шару розташований диспергатор. Завдяки застосуванню газорозподільної решітки у псевдозрідженому шарі створюються циркуляційні потоки.

При аналізі процесу зневоднення і гранулювання у псевдозрідженому шарі з точки зору оптимізації суттєвий вплив на ведення процесу мають енергетичні показники.

Якість гранул визначають багатьма властивостями і вимогами до них. З математичного погляду гранули являють собою систему, що характеризується сукупністю вихідних показників критеріальних властивостей, оптимізація яких доцільна з використанням узагальненого показника якості.

Постановка задачі

Метою даної статті є пошук зони оптимальних значень змінних технологічного процесу, що впливають на коефіцієнт грануло утворення для процесу псевдозрідження і гранулоутворення в апараті псевдозрідженого шару, побудова математичної моделі процесу, що враховує всі фактори, які впливають на якісний і кількісний показник процесу псевдо зрідження та перевірка адекватності математичної моделі.

В якості критерію оптимальності також можна вибрати максимальний вихід продукту при заданому гранулометричному складі, тобто зменшити пилеунос з апарату. Але на отримання постійного заданого гранулометричного складу суттєво впливає кінетика гранулоутворення у псевдозрідженому шарі. Тому в якості критерію оптимальності обрали максимальний коефіцієнт гранулоутворення.

Коефіцієнт гранулоутворення ψ є основною характеристикою грануляторів у псевдозрідженому шарі і визначається

$$\psi = \frac{G_{\text{гр}}}{G_{\text{р}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

де $G_{\text{гр}}$ – продуктивність гранулятора по гранульованому продукту, кг/с ;

$G_{\text{р}}$ – витрати розчину, що подається на диспергацію, кг/с .

Тобто коефіцієнт гранулоутворення показує, яка частина твердої фази з розчину гранулюється, а інша у вигляді пилу виноситься з апарату.

Низький ψ (менше 90%) може характеризувати процес грануляції, як не економічний із-за втрат енергії і ресурсу устаткування на вловлювання і повторну грануляцію пилу.

На коефіцієнт гранулоутворення впливають режимні параметри процесу (температура в шарі, маса шару і початкова швидкість крапель розчину в диспергаторі та інші фактори).

Аналіз процесу і окремі досліди показали, що збільшення швидкості диспергації, маси псевдозрідженого шару повинні сприяти росту ψ , а збільшення температури шару, його зменшенню. Науковий інтерес являє взаємовплив при одночасній зміні параметрів, для знаходження оптимальних режимів. Для цього був складений план експерименту на

основі раніше проведених досліджень, де були виявлені інтервали змін параметрів, в яких вірогідність агломерації гранул не висока. Це: температура шару $T_{ш} = 90 \div 100 \text{ } ^\circ\text{C}$, швидкість диспергації $U = 3,141 \div 5,655 \text{ м/с}$ і маса шару $M_{ш} = 6 \div 8 \text{ кг}$, яка однозначно характеризується перепадом тиску на псевдозрідженому шарі в межах $\Delta P = 1900 \div 2400 \text{ Па}$.

Для роботи установки, яка здійснює зневоднення і гранулювання продуктів необхідно підтримувати сталим (максимальним) коефіцієнт гранулоутворення, оскільки він є основним якісним і кількісним показником при виготовленні готової продукції.

Як незалежні змінні, що впливають на роботу установки, взяті узагальнені параметри:

1. перепад тиску (різниця між тиском над і під газорозподільною решіткою);
2. температура шару;
3. швидкість зріджуючого агента.

Як параметр оптимізації був вибраний коефіцієнт гранулоутворення.

Мета експерименту, що проводиться, – пошук оптимальних (найкращих) параметрів установки і режимів її роботи, при яких забезпечується максимальний вихід готової продукції.

Для отримання залежності вибрано модель неповного 2-го порядку

$$y = a_0x_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1x_2 + a_5x_1x_3 + a_6x_2x_3 + a_7x_1x_2x_3.$$

Така структура моделі вибрана у зв'язку з тим, що модель 1-го порядку характеризується суттєвою лінійністю, а модель 2-го порядку потребує різкого збільшення об'єму експериментальних досліджень.

Для побудови залежностей $\psi = f(\Delta P, T_{ш}, W_r)$ і $y = f(x_0, x_1, x_2, x_3)$ використовувався повний факторний експеримент типу 2^3 [1]. Рівні і інтервали варіювання змінних приведені в табл. 1, а матриця планування і результати експерименту – в табл. 2.

Таблица 1

Незалежні змінні	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	-1	0	+1	
$\Delta P, \text{ Па}$	1900	2150	2400	250
$T_{ш}, \text{ } ^\circ\text{C}$	90	95	100	5
$W_r, \text{ м/с}$	3,141	4,398	5,655	1,257

У таблиці прийняті наступні позначення: 0 – основний рівень; +1 – верхній рівень; -1 – нижній рівень.

Таблица 2

№	Планування								Параметри оптимізації					Дисперсія $(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2$
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_1'	y_1''	y_1'''	\bar{y}_i	\hat{y}_i	
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	81,7	82,1	80,5	81,43	81,87	0,19
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	92,4	89,5	90,2	90,7	90,07	0,4
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	85,1	76,5	84,7	82,1	82,73	0,4
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	70,8	68,2	69,6	69,53	69,1	0,19
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	89,3	80,3	84,7	84,77	84,33	0,19
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	74,7	68,7	77,5	73,63	74,27	0,4
7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	75,4	64,0	63,3	67,57	66,93	0,4
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	72,6	73,4	67,4	71,13	71,57	0,19

Експерименти проводили тільки на двох рівнях, рівні чинників є межі досліджуваної області по даному параметру. Точка з координатами $(u_{01}, u_{02}, \dots, u_{0k})$ є центром плану, або основним рівнем; Δu_i – інтервал варіювання але осі u_i . Від системи координат u_1, u_2, \dots, u_k перейдемо до нової безрозмірної системи координат x_1, x_2, \dots, x_k за допомогою наступного лінійного перетворення:

$$x_i = \frac{u_i - u_{0i}}{\Delta u_i}; i = \overline{0, k} \quad (2)$$

У безрозмірній системі координат верхній рівень відповідає +1, нижній рівень –1, координати центру плану рівні і співпадають з початком координат.

Коефіцієнти рівняння регресії по методу найменших квадратів визначають наступним чином

$$\beta = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b \end{pmatrix} = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (3)$$

Отже, будь-який коефіцієнт рівняння регресії b_i визначається скалярним добутком стовпця y на відповідний стовпець x_i діленим на число дослідів в матриці планування N :

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_{ij} y_j. \quad (4)$$

Оскільки коваріаційна матриця $(X^T X)^{-1}$ для спланованого експерименту діагональна

$$(X^T X)^{-1} = \begin{pmatrix} 1/N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/N & 0 & 0 \\ - & - & - & - \\ - & - & - & - \\ - & - & - & - \\ 0 & 0 & 0 & 1/N \end{pmatrix} \quad (5)$$

то коефіцієнти рівняння регресії не корельовані між собою. Значущість коефіцієнтів рівняння регресії можна перевіряти для кожного коефіцієнта окремо по критерію Стюдента. Діагональні елементи коваріаційної матриці рівні між собою, тому всі коефіцієнти рівняння визначаються з однаковою точністю:

$$S_{b_i} = \frac{1}{\sqrt{N}} S_{\text{восп.}} \quad (6)$$

Для всіх коефіцієнтів рівняння регресії складають співвідношення

$$t_i = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}, \quad (7)$$

яке порівнюють з табличним $t_{1-q}(f)$ для рівня значущості $q = 0,05$ і числа ступенів свободи $f = N(m-1)$. Якщо $t_1 < t_{1-q}(f)$, то приймають гіпотезу рівності нулю генерального коефіцієнта регресії, а відповідний вибірковий коефіцієнт, як незначущий, відсівають з рівняння регресії. При цьому зважаючи на ортогональність матриці планування решту ко-

ефіцієнтів не доводиться перераховувати.

В результаті проведення експерименту і обробки експериментальної інформації з урахуванням формул (4) – (7) отримано наступне рівняння:

$$y = 77,61x_0 - 1,36x_1 - 5,03x_2 - 3,33x_3 - 0,89x_1x_2 - 0,53x_1x_3 + 0,1x_2x_3 + 4,57x_1x_2x_3. \quad (8)$$

$$\text{де } x_1 = \frac{\Delta P - 2150}{250}; \quad x_2 = \frac{T_{\text{ш}} - 95}{5}; \quad x_3 = \frac{W_{\text{г}} - 4,398}{1,257}.$$

Оцінка значущості коефіцієнтів показала, що:

Таблиця 3

№	Коефіцієнти регресійної моделі	Рівень значущості	Коефіцієнт Стьюдента	Значущість
b_0	77,61	205,1	1,75	значущий
b_1	-1,36	3,59	1,75	значущий
b_2	-5,03	13,28	1,75	значущий
b_3	-3,33	8,81	1,75	значущий
b_{12}	-0,89	2,36	1,75	значущий
b_{13}	-0,53	1,41	1,75	не значущий
b_{23}	0,1	0,26	1,75	не значущий
b_{123}	4,57	12,07	1,75	значущий

коефіцієнти при x_1x_3 і x_2x_3 не значущі. Тому отримуємо математичну модель в наступному вигляді:

$$y = 77,61x_0 - 1,36x_1 - 5,03x_2 - 3,33x_3 - 0,89x_1x_2 + 4,57x_1x_2x_3. \quad (9)$$

Для перевірки адекватності отриманої моделі був використаний критерій Фішера. Значення розрахованого параметра $F = 1,03$ не перевищує критичного (табличного) $F_{\text{кр}} = 3,63$, тобто виконується нерівність $F \leq F_{\text{кр}}$, звідси робимо висновок, що отримана математична модель є адекватною процесу, що досліджувався.

З аналізу регресійної моделі видно, що найбільший вплив на вихідний параметр надає параметр x_2 , а найменший – x_1 , так, як коефіцієнт при ньому найменший. Для більш детального вивчення впливу кожної зі змінних x_i на вихідний параметр y_i побудуємо залежності $y_i = f(x_i)$ при фіксованих значеннях інших x_{i+1} змінних в центрі експерименту (рис. 1). Усі графіки являють собою прямі, що проходять через центр експерименту.

$$\begin{aligned} y &= 77,61 & x_1 = x_2 = x_3 &= 0 \\ y_1 &= 77,61 - 1,36x_1 & x_2 = x_3 &= 0 \\ y_2 &= 77,61 - 5,03x_2 & x_1 = x_3 &= 0 \\ y_3 &= 77,61 - 3,33x_3 & x_1 = x_2 &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Щоб отримати координати екстремуму цільової функції, прирівняли до нуля похідні по факторам і розв'язали отриману систему лінійних рівнянь

$$\begin{cases} -1,36 - 0,89x_2 + 4,57x_2x_3 = 0 \\ -5,03 - 0,89x_1 + 4,57x_2x_3 = 0 \\ -3,33 + 4,57x_2x_3 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

де розв'язок системи: $x_1 = 1,64$, $x_2 = 0,44$, $x_3 = 0,86$. Тобто параметри процесу набудуть наступних значень: $\Delta P = 2560$, Па; $T_{\text{ш}} = 97,2$, °C; $W_{\text{г}} = 5,48$, м/с

Отримані координати центра експерименту зсунуті відносно координат в яких проводились досліди. Це свідчить про те, що номінальні значення незалежних змінних вибрані неточно, але основною метою експериментів був пошук області оптимальних значень розглядуваного хіміко-технологічного процесу, яка представлена на рис. 1.

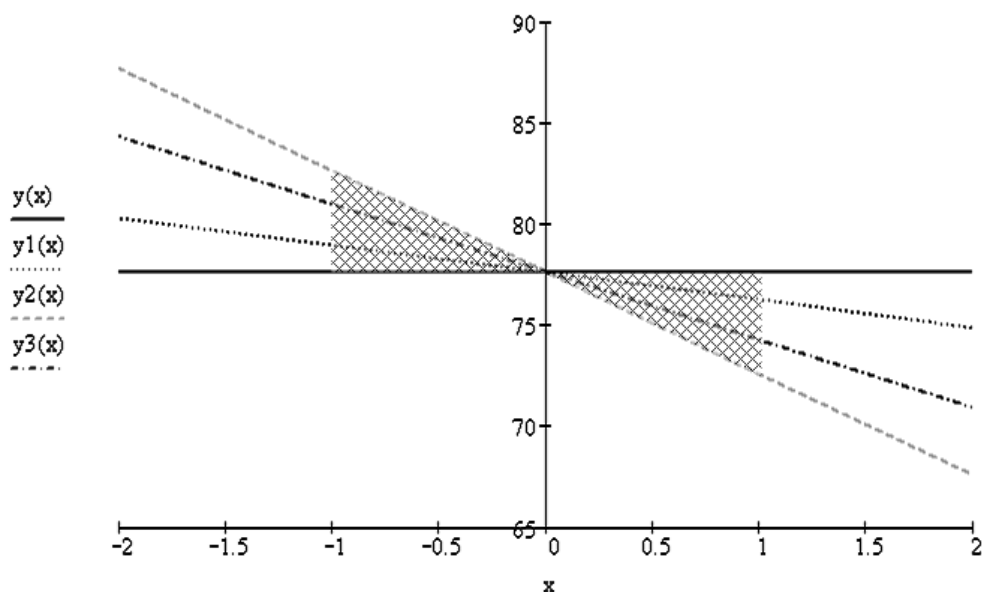


Рис 1 Графіки функції $y_i = f(x_i)$ для вибору оптимальної зони процесу зневоднення і гранулоутворення

Висновки

Результати, отримані за допомогою математичної моделі підтверджують технологічні параметри робочого режиму установки.

Такий підхід до розв'язку задачі оптимізації процесу гранулоутворення у псевдо-зрідженому шарі може бути застосований для більшої кількості технологічних параметрів. Для врахування обмеження по гранулометричному складу можна отримати регресійну модель еквівалентного діаметра від технологічних параметрів і розв'язати, як задачу умовної оптимізації.

For process fluidization and granulating in the device with the fluidized bed was carried the search of a zone of optimum values of variable technological process which influence factor granulating, the mathematical model of process is constructed which takes into account all factors, which influence a qualitative and quantitative parameter of process fluidization. The adequacy to mathematical model of process is checked up. By results of accounts are received the zones of optimum values of parameters of chemical-technological process.

1. Планирование эксперимента в технике / В.И. Барабашук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко; Под ред. Б.П. Креденцера. – Техніка, 1984. – 200 с., ил. – (Б-ка инженера). – Библиогр.: с. 196–198.

МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.313.3

ВЫБОР КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОЦЕССА ВКЛЮЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ НА ПАРАЛЛЕЛЬНУЮ РАБОТУ

Вишневецкий Л.В., Веретенник А.М., Войтецкий И.Е.

Судовые электроэнергетические системы современных судов в большинстве случаев являются многогенераторными, т.е. имеют в своем составе несколько (более двух) дизель-генераторов, валогенераторов, утильтурбогенераторов, которые работают параллельно на общие шины. Количество установленных электрогенераторов на конкретном судне зависит от его типа и от суммарной мощности потребителей [1, 2]. Основным режимом работы судовой электростанции является параллельная работа. Ввод нового генератора в работу является одним из типовых эксплуатационных режимов. Известно, что включение генератора переменного тока в сеть требует соблюдения определенных условий синхронизации частоты, напряжения и фаз генератора и сети [1, 2].

Технологически процесс включения генераторов на параллельную работу включает в себя несколько независимых операций, таких как выравнивание частот, согласование фазовых сдвигов и амплитуд напряжения генератора и сети. Возможные неточности и ошибки при выполнении операции синхронизации приводит к значительным переходным процессам в электростанции и даже к аварийным ситуациям.

Управление процессами включения предполагает в первую очередь оценку качества этих процедур. К сожалению, на сегодняшний день не существует единых общепринятых методик или критериев оценки качества переходных процессов при включении генераторов. В лучшем случае, констатируется факт включения генератора без биений или выпадения из синхронизма. Оценить качество синхронизации можно по времени или по интенсивности этого процесса.

В данной работе предлагается ввести критерий для оценки качества возникающих переходных процессов включения генераторов. Выбран вид критерия и методика его вычисления, а также параметр процесса, наиболее объективно отражающий его качество.

За основу формы критерия качества выбран общепринятый в автоматике функционал – интеграл модуля отклонения контролируемого параметра $y(t)$ от установившегося значения $y(\infty)$:

$$I = \int_0^{\infty} |\Delta y| dt, \quad (1)$$

где $\Delta y = y(t) - y(\infty)$. Пределы интегрирования целесообразно ограничить временем процесса втягивания в синхронизм (t_n, t_k) . Здесь t_n, t_k - время начала и конца переходного процесса. При моделировании системы электрогенераторов на цифровой ЭВМ численными методами расчет интегрального критерия (1) можно заменить суммой модулей отклонений $\Delta y_i = y(t_n + \sum_{j=0}^i \Delta t_j) - y(t_k)$ за период расчета переходного процесса

$$I = \sum_{i=1}^N |\Delta y_i|, \quad (2)$$

здесь Δt_j - шаг интегрирования. Приведенное выражение интегрального критерия (2) будет пропорционально интегралу, если применяется численный метод с постоянным шагом. При изменяющемся шаге выражение под суммой следует умножить на Δt_i , т.е.

$$I = \sum_{i=1}^N |\Delta y_i| \cdot \Delta t_i. \quad (3)$$

Расчет критерия качества проводился на модели параллельной работы двух синхронных дизель-генераторов различной мощности. Результаты моделирования процесса включения генераторов на параллельную работу показаны на рис. 1.

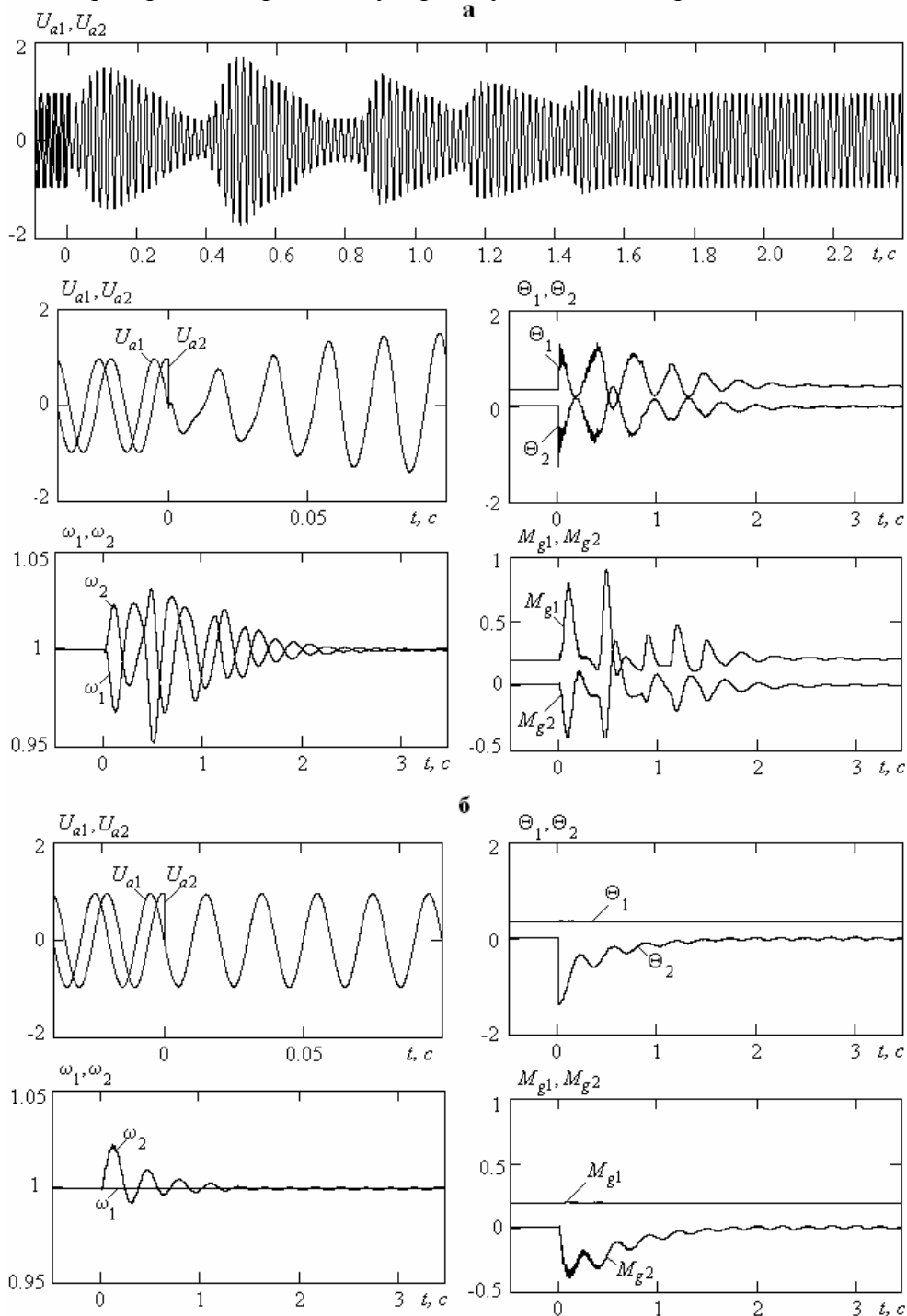


Рис. 1 Результаты моделирования переходных процессов включения синхронных дизель-генераторов на параллельную работу:
а – агрегаты одинаковой мощности; б – включение в береговую сеть большой мощности

При моделировании оценивались те параметры процесса, которые характеризуют его электромеханическую сущность. На рис. 1 показаны изменения статорных напряжений U_{a1}, U_{a2} , углов нагрузки Θ_1, Θ_2 , частот вращения роторов ω_1, ω_2 и электромагнитных моментов M_{g1}, M_{g2} генераторов и сети.

При моделировании параллельно с расчетом электромеханических параметров, вычислялись следующие критерии: суммы модулей отклонения от установившихся значений частот I_ω , углов нагрузки I_Θ и электромагнитных моментов I_M .

На рис. 2 показаны результаты расчетов частот вращения роторов ω_1, ω_2 и соответствующих критериев $I_{\omega1}, I_{\omega2}$ для трех разных углов рассогласования синхронизируемого напряжения.

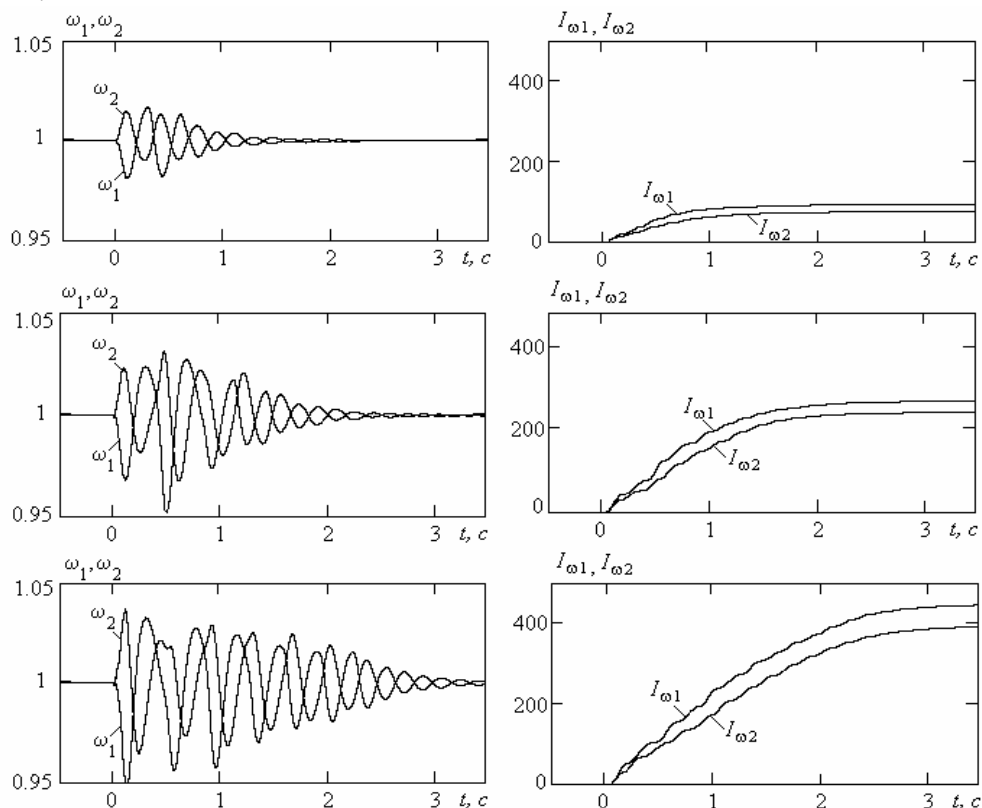


Рис. 2 Расчет критериев качества $I_{\omega1}, I_{\omega2}$ включения двух генераторов на параллельную работу при разных углах рассогласования фаз

Как видно из рис. 2, монотонно растущие функции $I_{\omega1}(t), I_{\omega2}(t)$ принимают постоянные значения к концу переходного процесса. Эти установившиеся значения предлагается использовать в качестве критерия, позволяющего сравнивать между собой переходные процессы включения генераторов на параллельную работу. Изменяя угол рассогласования фаз при равных частотах и напряжениях включаемых генераторов, рассчитаны значения критериев I_M, I_ω и I_Θ в зависимости от разности фаз. На рис. 3 приведены эти зависимости для режимов включения генератора в мощную сеть (рис. 3, а) и двух одинаковых генераторов (рис. 3, б).

Сравнение характера кривых критериев I_M, I_ω и I_Θ показывает их идентичность, т.к. момент, частота и угол нагрузки – это параметры одного и того же энергетического процесса.

Особенности расчета критериев I_M, I_ω и I_Θ заключаются в том, что заранее неизвестно установившееся значение контролируемого параметра $y(\infty)$ или $y(t_k)$, впрочем, как и время втягивания в синхронизм t_k . Поэтому расчет процесса нужно повторить еще раз для уточнения значения t_k и $y(t_k)$. Эти значения затем вводятся в программу для расчета критерия $I(t_k)$.

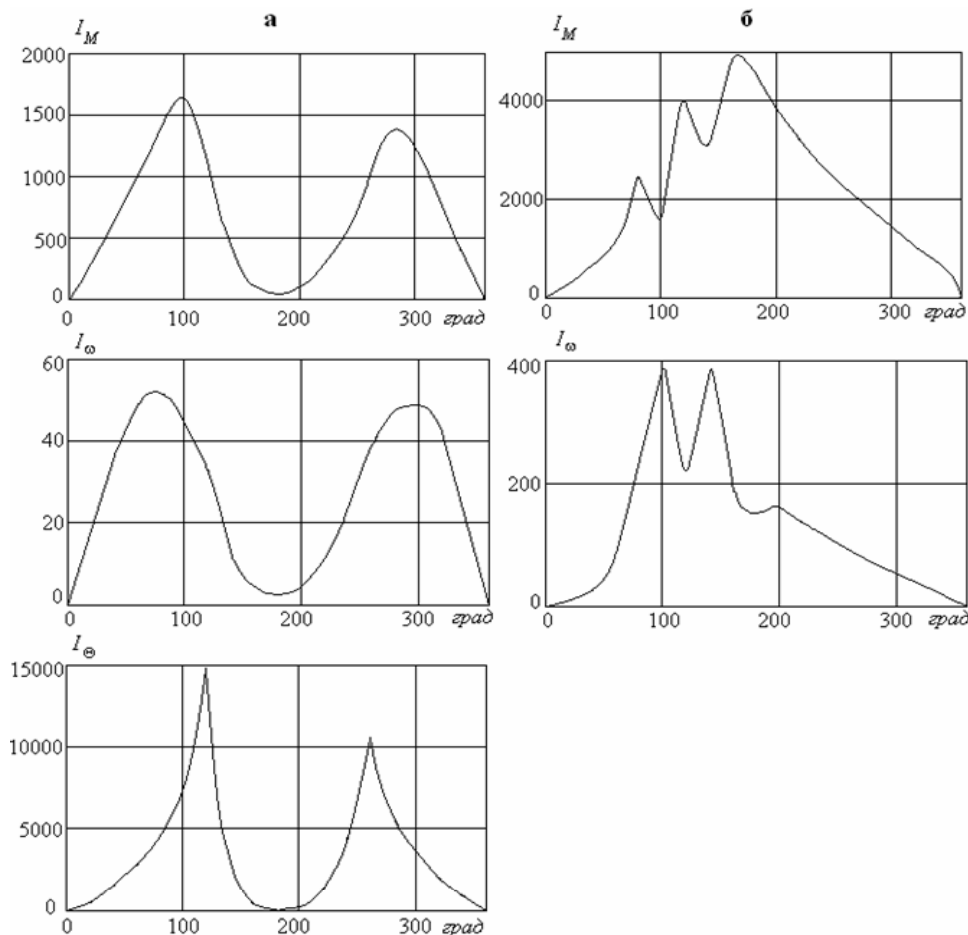


Рис. 3 Зависимости критериев I_M , I_ω и I_Θ от разности фаз:

а – включение в мощную сеть; б – включение одинаковых генераторов

Если значение $y(t_k)$ будет определено неточно, то критерий $I(t)$ не будет стремиться к постоянному значению, а будет постоянно возрастать.

Выводы

1. Предложенные критерии I_M , I_ω и I_Θ позволяют численно оценить процесс втягивания генераторов в синхронизм.
2. Наиболее объективным и удобным показателем качества является площадь под кривой частоты вращения ротора генератора или I_ω . Частоту вращения можно не только рассчитать на модели, но и измерить на действующем агрегате.
3. Предлагаемый критерий позволяет сравнивать между собой процессы включения на параллельную работу, проводить оптимизацию конструктивных параметров и способов управления синхронизацией генераторов.

The integral criteria of quality of transitional processes of including of generators are considered on parallel work. The integral rejections of frequencies, moments and corners of loading at the different phase corners of the included generators are confronted. The offered criterion allows to compare between itself the processes of including on parallel work, to conduct optimization of structural parameters and methods of management synchronization of generators.

1. Баранов А.П. Судовые автоматизированные электроэнергетические системы. – М.: Транспорт, 1988. – 328 с.
2. Лейкин В.С., Михайлов В.А. Автоматизированные электроэнергетические системы промышленных судов: Учебное пособие для вузов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 412 с.

ОБ УСКОРЕНИИ СХОДИМОСТИ ПРОЦЕССОВ В АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЕ С ОБРАТНОЙ МОДЕЛЬЮ

Клименко А.К.

1. Постановка проблемы и ее связь с практическими заданиями. Известны автоматизированные технологические объекты (АТО), в которых управление осуществляется по циклически повторяющимся программам. Примерами таких АТО являются металлорежущие станки с программным управлением и станы горячей прокатки. Управляющие программы готовятся в условиях неполной информации об объекте управления и возмущающих воздействиях. Поэтому требуется корректировка управляющих программ как во время их разработки, так и в процессе эксплуатации. Системы, в которых осуществляется такая корректировка, называются системами с самоустанавливающейся программой [1], самонастраивающимися системами «от детали к детали» [2] и адаптивными системами [3]. В данной статье будем называть их системами с адаптивной корректировкой управляющих программ.

При корректировке текущей программы используется информации об ошибках в предыдущих циклах ее воспроизведения. Эти ошибки суммируются с исходной программой при помощи дискретного интегратора (ДИ).

Корректировка программ осуществляется по формуле

$$c_v(n) = c_{v-1}(n) + \Delta c_v(n) = c_{v-1}(n) + \gamma_v f\{\varepsilon_{v-1}(n)\}, n \in [0, N], v=1,2,\dots, \quad (1)$$

где n – дискретное время, v – номер цикла воспроизведения программы, N – количество кадров в программе, $c_v(n)$ и $\Delta c_v(n)$ – корректирующий сигнал и его приращение, γ_v – коэффициент усиления в контуре адаптивной корректировки, $\varepsilon_{v-1}(n)$ – ошибка предшествующего цикла воспроизведения управляющей программы, $f\{\cdot\}$ – функция, определяемая этой ошибкой и обеспечивающая сходимость процесса ее минимизации.

Ошибки изготовления деталей состоят из регулярной и случайной составляющих. Последняя является центрированной аддитивной. Источником ее могут выступать как процесс обработки деталей сложной формы, так и ошибки автоматического измерения размеров последних.

В дальнейшем будем пользоваться следующим выражением для общей ошибки воспроизведения программы v -го цикла:

$$\varepsilon_v(n) = \bar{\varepsilon}_v(n) + \tilde{\varepsilon}_v(n), n \in [0, N], \quad (2)$$

где $\bar{\varepsilon}_v(n)$ и $\tilde{\varepsilon}_v(n)$ – соответственно регулярная и случайная составляющие.

Целью адаптации является формирование корректирующего сигнала, обеспечивающего сведение к нулю регулярной составляющей ошибки, т.е. $\bar{\varepsilon}_v(n) \rightarrow 0$ и/или к сведению к нулю среднего квадрата общей ошибки: $M\{[\varepsilon_{v+1}(n)]^2\} \rightarrow \min$. Для этого требуется сходимость процесса (1). На обеспечение сходимости и на ее скорость влияет коэффициент усиления γ_v в контуре адаптации.

Общий вид вычисления поправки на корректирующий сигнал в контуре адаптации имеет вид:

$$\Delta c_v(n) = \gamma_v \varepsilon_{v-1}(n),$$

где $\varepsilon_{v-1}(n)$ – ошибка предыдущего цикла воспроизведения программы.

Имеется ряд публикаций по решению проблемы обеспечения сходимости процесса адаптации (1). Требуется дальнейшее решение задачи повышения скорости сходимости.

Анализ известных решений. Найденные технические решения зависят от того, имеется ли в ошибках воспроизведения управляющих программ случайная составляющая, и изменяются ли во времени статистические характеристики этой составляющей.

При решении задачи обеспечения сходимости процесса в условиях помех оказалось эффективным применение математического аппарата - метода стохастической аппроксимации. Обзор метода приведен в [4]. Рекомендации по его использованию даны в [3]. Проблемы обеспечения сходимости порождаются тем обстоятельством, что условия сходимости для регулярной и случайной составляющих ошибки различны. Как следует из [3,4], для обеспечения сходимости процесса (1) в условиях, когда регулярная и случайная составляющие возмущающего воздействия стационарны, коэффициент усиления должен удовлетворять требованиям:

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \gamma_{\nu} = \infty, \quad (3)$$

$$\sum_{\nu=1}^{\infty} \gamma_{\nu}^2 < \infty. \quad (4)$$

Условие (3) относится к регулярной составляющей ошибки, а условие (4) – к случайной составляющей. Выполнение последнего требует бесконечного числа циклов корректировки, что на практике нежелательно.

Как известно [5], применение обратных моделей (ОМ) динамических объектов создает предпосылки для решения многих задач в области управления. Использование ОМ АТО оказалось эффективным и в задаче обеспечения сходимости регулярной составляющей процесса (1). Это показано в работе [6]. Достоинством использования ОМ АТО является то, что, в случае отсутствия случайной помехи, регулярная составляющая ошибки воспроизведения программы полностью устраняется после одного цикла ее корректировки. В источнике [7] предложено техническое решение ОМ, пригодное для использования в системе с адаптивной корректировкой управляющих программ, а в (8) приведено математическое обоснование этого решения. Упрощенная методика конструирования ОМ с желаемыми показателями качества предложена в [9].

Эффективность использования ОМ в цепи адаптации теряется при работе в условиях случайных возмущающих воздействий. Например, если регулярная составляющая отсутствует, а случайная имеется, корректировка программы с выполнением условий (3) и (4) порождает появление регулярной составляющей. Ею становится случайная составляющая, зарегистрированная при предыдущем воспроизведении программы и введенная в дискретный интегратор.

Имеется также решение [10] проблемы подстройки коэффициента усиления для минимизации ошибки воспроизведения программы в условиях, когда соотношение между регулярной и случайной составляющими могут медленно, но непредсказуемо изменяться во времени. Эффективность этого решения достигается сочетанием использования ОМ АТО со статистическим анализом ошибок управления. В этом случае осуществляется такая подстройка коэффициента усиления, которая минимизирует среднеквадратичную ошибку непосредственно следующего воспроизведения управляющей программы. При вычислении подаваемой на вход дискретного интегратора поправки для $(\nu + 1)$ -го цикла воспроизведения программы используется формула:

$$\Delta c_{\nu+1}(n) = \gamma_{\nu+1} \varepsilon_{\nu}(n+1), \quad (5)$$

где $\varepsilon_{\nu}(n+1)$ -- ошибка предыдущего цикла воспроизведения.

Недостатком предложенного в [10] способа оптимизации коэффициента усиления адаптивной системы в условиях помех является необходимость проведения двух циклов воспроизведения программы для проведения статистического анализа их ошибок при вычислении поправки для последующего цикла. Из-за этого снижается скорость адаптации управляющей программы.

Целью данной работы является повышение скорости адаптации при использовании технического решения [10] за счет повышения точности корректировки программ при наличии помех.

Постановка задач. Для достижения поставленной цели при вычислении поправки текущего цикла воспроизведения программы используется усредненное значение $\delta_v(n)$ ошибок двух циклов, т.е.

$$\delta_v(n) = \frac{\varepsilon_v(n)}{2} + \frac{\varepsilon_{v-1}(n)}{2}. \quad (6)$$

В этом случае при вычислении поправки формула (5) преобразуется к виду:

$$\Delta c_{v+1}(n) = \gamma_{v+1} \delta_v(n+1). \quad (7)$$

Как показано в работе [10], при вычислении поправки по формуле (5) оптимальный коэффициент адаптивной системы определяется статистическими характеристиками ошибки управления следующей зависимостью:

$$\gamma_{v+1} = \frac{M\{[\bar{\varepsilon}_v(n)]^2\}}{M\{[\bar{\varepsilon}_v(n)]^2\} + M\{[\varepsilon_v(n)]^2\}}, \quad n \in [0, N] \quad (8)$$

В свою очередь, определяемый выражением (8) оптимальный коэффициент может быть вычислен на основании зарегистрированных ошибок двух циклов воспроизведения программы:

$$\gamma_{v+1} = \frac{M_+ - M_-}{M_+ + M_-} = \frac{M\{[\varepsilon_{v-1}(n) + \varepsilon_v(n)]^2\} - M\{[\varepsilon_{v-1}(n) - \varepsilon_v(n)]^2\}}{M\{[\varepsilon_{v-1}(n) + \varepsilon_v(n)]^2\} + M\{[\varepsilon_{v-1}(n) - \varepsilon_v(n)]^2\}}, \quad (9)$$

где символами M_+ и M_- обозначены средние квадраты соответственно суммы и разности зарегистрированных ошибок.

В данной работе исследуется описанная в [10] адаптивная система, в которую внесено изменение: при вычислении поправки на программу вместо формулы (5) используется формула (7).

Задачами работы являются:

- определение влияния внесенного изменения в адаптивную систему на формулы (8) и (9) при определении оптимального коэффициента усиления;
- экспериментальная проверка эффективности полученного технического решения.

Изложение результатов исследования. Для пояснения работы рассматриваемой системы с адаптивной корректировкой управляющих программ на рис.1 приведена ее структурная схема. Символами на схеме обозначены: УП – управляющая программа, АТО – автоматизированный технологический объект, ОМ – обратная модель, ДИ – дискретный интегратор, БСА – блок статистического анализа, БУ – блок усреднения. Работа системы состоит в следующем. Предполагается, что АТО является односвязным непрерывным объектом, но все приведенные на схеме сигналы рассматриваются в дискретном времени (являются решетчатыми функциями). Управляющая программа $x(n)$ циклически повторяется и не изменяется от цикла к циклу. Она же служит и для измерения ошибок обработанных деталей. Продолжительность программы – N тактов дискретного времени. Ошибки могут быть измерены как одновременно с выполнением программы (на прокатном стане), так и в промежутках между циклами (металлорежущие станки).

Входящая в систему ОМ выполнена таким образом, что импульсная переходная функция комплекса «ОМ-АТО» удовлетворяет требованиям:

$$k(n) = \begin{cases} 1 & \text{если } n = 1, \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (10)$$

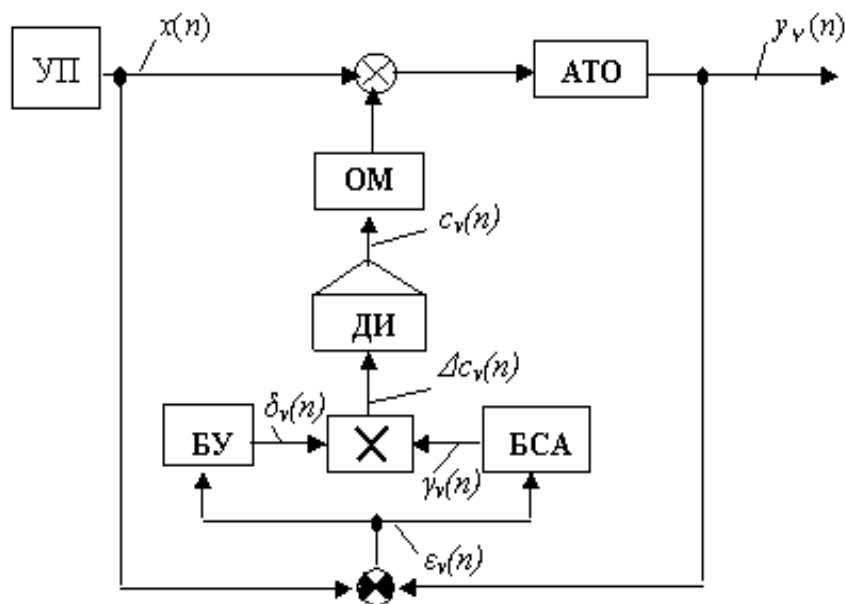


Рис.1. Структурная схема системы адаптивного управления

БСА предназначен для нахождения оптимального γ_v , обеспечивающего минимум среднеквадратичной ошибки воспроизведения программы после ее корректировки по результатам анализа ошибок предыдущих воспроизведений.

БУ осуществляет усреднение регистрируемых ошибок управления попарно согласно (6) и подает получаемый сигнал на один из входов блока умножения. На второй вход блока умножения с выхода БСА поступает вычисленное значение оптимального коэффициента усиления.

ОМ, обеспечивающая получение импульсной переходной функции (10) в комплексе «ОМ-АТО», отличается от идеальной временным запаздыванием на один такт дискретного времени. Поэтому выходной сигнал блока умножения подается на вход дискретного интегратора с опережающим временным сдвигом на ту же величину, т.е.

$$\Delta c_{v+1}(n) = \gamma_{v+1} \varepsilon_v(n+1). \quad (11)$$

В качестве статистических характеристик регулярной и случайной составляющих зарегистрированных ошибок принимаются их среднеквадратичные значения на интервале цикла. Поскольку случайная составляющая принимается аддитивной, между средним квадратом общей ошибки и средними квадратами ее составляющих справедливо соотношение:

$$M\{\varepsilon_v(n)^2\} = M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\} + M\{\tilde{\varepsilon}_v(n)^2\}, \quad n \in [0, N].$$

Сначала находим зависимость коэффициента усиления γ_{v+1} от средних квадратов составляющих ошибки предыдущих воспроизведений программы, т.е. от $M\{\bar{\varepsilon}_v(n)^2\}$ и $M\{\tilde{\varepsilon}_v(n)^2\}$, обеспечивающего минимум среднеквадратичного значения общей ошибки последующего воспроизведения программы: $M\{\varepsilon_{v+1}(n)^2\} \rightarrow \min$.

При решении этой задачи принимается, что статистические характеристики регулярной и случайной составляющих ошибки могут изменяться во времени, но настолько медленно, что на протяжении двух соседних циклов могут считаться постоянными.

Изложение результатов исследования. Сначала находим выражение для ошибки $(v+1)$ -го воспроизведения управляющей программы. Оно отличается от выражения (2) из-за введения поправки (11) в дискретный интегратор:

$$\varepsilon_{v+1}(n) = \bar{\varepsilon}_{v+1}(n) + \tilde{\varepsilon}_{v+1}(n) + \Delta \varepsilon_{v+1}(n), \quad (12)$$

где $\Delta\varepsilon_{v+1}(n)$ — приращение ошибки, порождаемое этой поправкой.

Учитывая, что поправка (11) проходит через систему “ОМ—АТО”, описываемую импульсной переходной функцией (10), и меняет знак в элементе сравнения, для приращения ошибки находим выражение с использованием формулы свертки :

$$\Delta\varepsilon_{v+1}(n) = -\sum_{m=0}^n \Delta c_{v+1}(n-m)k(m) = -\sum_{m=0}^n \gamma_{v+1} \bar{\delta}_v(n+1-m)k(m) = -\gamma_{v+1} \bar{\delta}_v(n). \quad (13)$$

В дальнейших выкладках учитываем следующие обстоятельства.

Регулярная составляющая ошибки в соседних циклах воспроизведения программы не успевает измениться, т.е.

$$\bar{\varepsilon}_{v+1}(n) = \bar{\varepsilon}_v(n), \quad (14)$$

случайная составляющая аддитивна и удовлетворяет требованиям:

$$\tilde{\varepsilon}_{v+1}(n) \neq \tilde{\varepsilon}_v(n), \quad (15)$$

$$M\{[\tilde{\varepsilon}_{v+1}(n)]^2\} = M\{[\tilde{\varepsilon}_v(n)]^2\} = M\{[\tilde{\varepsilon}_{v-1}(n)]^2\}, \quad (16)$$

а выражение (6) для усредненной ошибки можно преобразовать к виду

$$\bar{\delta}_v(n) = \bar{\varepsilon}_v(n) + \tilde{\varepsilon}_{v-1}(n)/2 + \tilde{\varepsilon}_v(n)/2 \quad (17)$$

Выражение для ошибки (12) после преобразований с использованием зависимостей (13, 14, 15, 16 и 17) получит вид:

$$\varepsilon_{v+1}(n) = \bar{\varepsilon}_v(n)(1-\gamma_{v+1}) + \tilde{\varepsilon}_{v+1}(n) - \gamma_{v+1} \tilde{\varepsilon}_v(n)/2 - \gamma_{v+1} \varepsilon_{v-1}(n)/2,$$

а ее средний квадрат на интервале $[0, N]$ с учетом аддитивности помехи и справедливости выражения (16) :

$$\begin{aligned} M\{[\varepsilon_{v+1}(n)]^2\} &= M\{[\bar{\varepsilon}_v(n)]^2(1-\gamma_{v+1})^2\} + M\{[\tilde{\varepsilon}_{v+1}(n)]^2\} + M\{[\gamma_{v+1} \tilde{\varepsilon}_v(n)/2]^2\} + M\{[\gamma_{v+1} \varepsilon_{v-1}(n)/2]^2\} = \\ &= (1-\gamma_{v+1})^2 M\{[\bar{\varepsilon}_v(n)]^2\} + M\{[\tilde{\varepsilon}_{v+1}(n)]^2\} + \frac{1}{2}(\gamma_{v+1})^2 M\{[\tilde{\varepsilon}_v(n)]^2\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Продифференцировав выражение (18) по γ_{v+1} , приравняв полученную производную нулю, и решив образовавшееся уравнение, находим выражение для оптимального коэффициента γ_{v+1} в функции вероятностных характеристик регулярной и случайной составляющих ошибки управления в предыдущих циклах:

$$\gamma_{v+1} = \frac{2M\{[\bar{\varepsilon}_v(n)]^2\}}{2M\{[\bar{\varepsilon}_v(n)]^2\} + M\{[\tilde{\varepsilon}_v(n)]^2\}}. \quad (19)$$

Таким образом, оптимальный коэффициент усиления в рассматриваемой адаптивной системе отличается от оптимального коэффициента адаптивной системы [10], величина которого определяется выражением (8).

Теперь рассмотрим задачу определения численных значений входящих в выражение (19) квадратов при работе адаптивной системы по рис.1. Эта задача выполняется с помощью блока статистического анализа БСА следующим образом.

Регистрируются ошибки двух циклов воспроизведения программы. В промежутках между ними изменения в дискретный интегратор не вносятся. Ошибки имеют вид

$$\varepsilon_v(n) = \bar{\varepsilon}_v(n) + \tilde{\varepsilon}_v(n), \quad \varepsilon_{v-1}(n) = \bar{\varepsilon}_{v-1}(n) + \tilde{\varepsilon}_{v-1}(n),$$

а между их параметрами справедливы соотношения:

$$\bar{\varepsilon}_v(n) = \bar{\varepsilon}_{v-1}(n), \quad \tilde{\varepsilon}_v(n) \neq \tilde{\varepsilon}_{v-1}(n), \quad M\{[\tilde{\varepsilon}_v(n)]^2\} = M\{[\tilde{\varepsilon}_{v-1}(n)]^2\}.$$

С учетом этих зависимостей формируются сумма и разность зарегистрированных ошибок:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{v-1}(n) + \varepsilon_v(n) &= 2\bar{\varepsilon}_v(n) + \tilde{\varepsilon}_v(n) + \tilde{\varepsilon}_{v-1}(n), \\ \varepsilon_{v-1}(n) - \varepsilon_v(n) &= \tilde{\varepsilon}_v(n) - \tilde{\varepsilon}_{v-1}(n), \end{aligned}$$

и вычисляются их средние квадраты:

$$\left. \begin{aligned} M_+ &= M \left\{ [\varepsilon_{v-1}(n) + \varepsilon_v(n)]^2 \right\} = 4M \left\{ [\bar{\varepsilon}_v(n)]^2 \right\} + 2M \left\{ [\tilde{\varepsilon}_v(n)]^2 \right\} \\ M_- &= M \left\{ [\varepsilon_{v-1}(n) - \varepsilon_v(n)]^2 \right\} = 2M \left\{ [\tilde{\varepsilon}_v(n)]^2 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Решив полученную систему уравнений, находим выражения для средних квадратов регулярной и случайной составляющих ошибки:

$$M \left\{ [\bar{\varepsilon}_v(n)]^2 \right\} = \frac{M_+ - M_-}{4}, \quad M \left\{ [\tilde{\varepsilon}_v(n)]^2 \right\} = \frac{M_-}{2}.$$

Подставив полученные значения средних квадратов в формулу (19), и, используя обозначения M_+ и M_- из системы (20), приходим к выражению для оптимального коэффициента усиления в адаптивной системе по рис.1 в функции зарегистрированных ошибок двух циклов воспроизведения программы:

$$\gamma_{v+1} = 1 - \frac{M_-}{M_+} = 1 - \frac{M \left\{ [\varepsilon_{v-1}(n) - \varepsilon_v(n)]^2 \right\}}{M \left\{ [\varepsilon_{v-1}(n) + \varepsilon_v(n)]^2 \right\}}. \quad (21)$$

Сопоставление зависимостей (21) и (9) показывает отличие оптимальных коэффициентов усиления в адаптивной системе по рис.1 и в системе, описанной в [10].

Экспериментальная часть. Эффективность рассматриваемого технического решения в сравнении с известным можно проверить на экспериментах. Из анализа формул (19) и (21) следует, что величина получаемого коэффициента усиления может изменяться в пределах от 0 до 1. Это совпадает с полученным в работе [10] результатом.

Если в регистрируемых ошибках присутствует только одна из составляющих (регулярная или случайная), то оптимальные коэффициенты усиления сопоставляемых систем идентичны. При равенстве нулю регулярной составляющей $M \left\{ [\bar{\varepsilon}_v(n)]^2 \right\} = 0$ и оптимальный коэффициентом будет $\gamma_{v+1} = 0$. При отсутствии случайной составляющей $M \left\{ [\tilde{\varepsilon}_v(n)]^2 \right\} = 0$, а оптимальный коэффициент $\gamma_{v+1} = 1$.

Преимущества рассматриваемого способа вычисления оптимального коэффициента усиления имеют место только в случае одновременного присутствия в ошибке регулярной и случайной составляющих.

Рассмотрим пример.

Пусть в зарегистрированных ошибках средние квадраты регулярной и случайной составляющих имеют значения $M \left\{ [\bar{\varepsilon}_v(n)]^2 \right\} = 0.8$, $M \left\{ [\tilde{\varepsilon}_v(n)]^2 \right\} = 0.2$. Средний квадрат общей ошибки равен сумме квадратов составляющих, т.е. равен единице: $M \left\{ [\varepsilon_{v+1}(n)]^2 \right\} = 1$.

Если корректировку выполнить по предложенному в [10] способу, то оптимальный коэффициент согласно формуле (8) $\gamma_{v+1} = 0.8$, а средний квадрат ошибки уменьшится до $M \left\{ [\varepsilon_{v+1}(n)]^2 \right\} = 0.362$ (формула для вычисления приведена в [10] на стр. 129).

При корректировке же по предлагаемому в данной работе способу оптимальный коэффициент системы составит $\gamma_{v+1} = 0.889$ (по формуле (19)), а средний квадрат общей ошибки будет снижен до $M \left\{ [\varepsilon_{v+1}(n)]^2 \right\} = 0.289$ (по формуле (21)).

Выводы по результатам исследований. Приведенный пример подтверждает преимущество предлагаемого способа адаптивной корректировки управляющих программ перед противопоставленным. Из-за повышения точности каждого цикла корректировки требуется их меньшее количество для доведения точности управления по программе до заданной величины. Тем самым повышается скорость процесса адаптации.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем автоматизированного проектирования и отладки программ автоматического управления дискретно-непрерывными технологическими процессами.

The way of velocity increasing of convergence of processes of adaptive correctness of controlling programs in a system is considered, adaptive contour of which has discrete integrator, return model of automated model and block of statistical analysis of control errors. For acceleration of process of adaptation it is offered at formation of input signals of discrete integrator use an average value of errors of each two loops of program reproduction.

1. Перельман И.И. Регулирование по принципу самоустанавливающейся программы // Автоматика и телемеханика. – 1958, №9. – С. 813-823.
2. Кобринский А.Е., Колискор А.Ш., Левковский Е.И., Попов В.Е., Сергеев В.И. Самонастраивающаяся система программного управления станками // Вестник АН СССР. – 1965, №9. – С. 52-57.
3. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. – М.: Наука, 1968. – 400 с.
4. Логинов Н.В. Методы стохастической аппроксимации // Автоматика и телемеханика. – 1966, №4. – С. 185-203.
5. Костенко Ю.Т., Любчик Л.М. Системы управления с динамическими моделями. Харьков: Основа, 1996. – 212 с.
6. Клименко А.К. О сходимости процессов адаптации в цифровых системах программного управления станками // Сб. «Адаптивные системы управления металлорежущими станками» / Под ред. А.Е. Кобринского, Сер. С-1. — М.: НИИМАШ, 1971.— С.58-67
7. Клименко А.К., Клименко В.Г. Корректирующее устройство. – Авт. свид. СССР №1406563.– Бюллетень изобретений, №24, 1988.
8. Клименко А.К. Обратная модель для решения задач управления и контроля качества / Методы менеджмента качества // Надежность и контроль качества. – 1999 – №8. – С. 32-39.
9. Клименко А.К. Об упрощенном численном конструировании обратной модели динамического объекта// Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2007, №1. – С.16-24.
10. Клименко А.К. Об оптимизации коэффициента усиления в адаптивной системе с обратной моделью // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2006, №2. – С.125-131.

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Ковриго Ю.М., Мовчан А.П., Полищук И.А., Фоменко Б.В.

При проектировании систем автоматического регулирования важную роль играет получение точной математической модели объекта и расчёт настроек регуляторов с помощью этой модели. Однако, полученные на стадии проектирования по математической модели объекта настройки регуляторов обычно в значительной степени отличаются от оптимальных, что объясняется изменением динамических характеристик с течением времени, а также изменением нагрузки объекта в процессе его работы. Например, для прямого котла тгмп по каналу “подача топлива – температура за потолочным экраном” коэффициент передачи в диапазоне рабочих нагрузок изменяется в $3 \div 4$ раза [1]; в системе автоматического регулирования процесса кондиционирования коэффициент передачи за счёт нелинейности характеристик изменяется в $2 \div 3$ раза; в передаточной функции участка регулирования температуры перегретого пара за парогенератором постоянные времени и коэффициент передачи изменяются в $2 \div 3$ раза в зависимости от нагрузки.

Кроме того получение точной математической модели затруднено нестационарностью объекта и влиянием на работу системы обслуживающего персонала. Поэтому при пуске объекта работы по настройке асп оказываются неизбежными. При этом возникают организационные проблемы. Из-за большого количества настраиваемых контуров работы по настройке асп требуют высокого профессионального матерства обслуживающего персонала. Поэтому возникает необходимость применения систем управления, обладающих способностью к самонастройке или адаптивных сау.

На сегодняшний день наиболее высокие показатели качества и устойчивость к наличию промышленных помех показывают линейные регуляторы, а именно пи, пид законы регулирования. Эти алгоритмы характеризуются отсутствием статической ошибки и простотой реализации. Поэтому большинство асу тп построены с использованием именно этих алгоритмов. Этот фактор является определяющим при разработке адаптивных систем регулирования, которые сконцентрированы на коррекцию настроек пи, пид законов регулирования.

Авторами предложено ряд методов и алгоритмов, позволяющих производить коррекцию параметров ПИ, ПИД алгоритмов:

- коррекция по анализу начального участка переходного процесса в замкнутом контуре;
- настройка при подаче возмущения в разомкнутом контуре;
- нечёткая коррекция по анализу показателей качества переходного процесса;
- WAR коррекция [3];
- параметрическая оптимизация по заданному критерию.

Коррекция по анализу начального участка переходного процесса в замкнутом контуре

Для автоматического регулирования квазистационарных оюъектов предложен алгоритм настройки на основе ПИ, ПИД регуляторов, который использует информацию о времени t_1 достижения максимума модуля первой производной выходной величины $y(t)$ (или ошибки регулирования $\varepsilon(t)$) в точке перегиба (рис. 1), а также о модуле $y(t_1)$ и производной от $y(t_1)$ при подаче тестового возмущения по выходной величине объекта или по заданию.

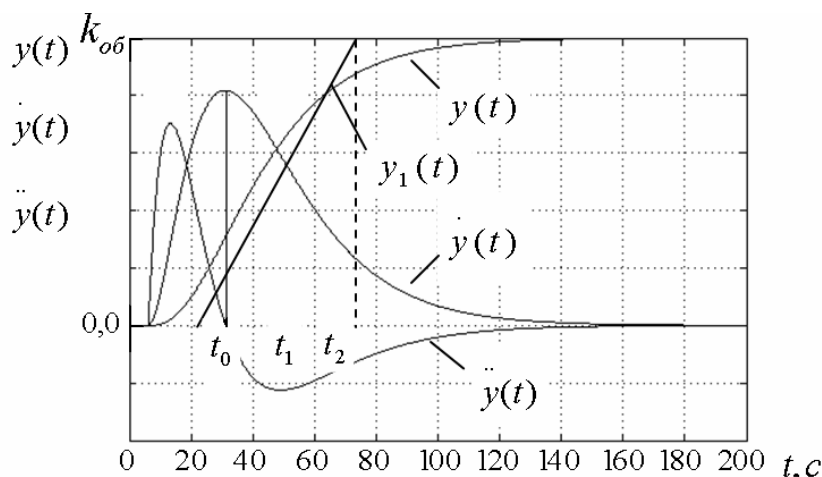


Рис.1. Переходная характеристика, производная и вторая производная от неё.

На рис.1 $\dot{y}(t)$, $\ddot{y}(t)$ показаны в увеличенном масштабе: $\dot{y}(t) \cdot 1000$, $\ddot{y}(t) \cdot 10000$.

Пошаговая структура алгоритма

Шаг 1. Подача тестового возмущения по выходной величине объекта (или по заданию).

Шаг 2. Определение максимума первой производной от сигнала рассогласования. Для этого используется алгоритм сравнения двух последних измерений модуля производной сигнала рассогласования - $|\dot{\varepsilon}(t_i)|$ и $|\dot{\varepsilon}(t)|$. В тот момент, когда новое значение модуля

производной сигнала рассогласования $|\dot{\varepsilon}(t_i)|$ становится меньше предыдущего $|\dot{\varepsilon}(t_{i-1})|$, определение максимума модуля производной сигнала рассогласования заканчивается. При этом максимальным значением модуля производной сигнала рассогласования считается $|\dot{\varepsilon}(t_1)| = |\dot{\varepsilon}(t_{i-1})|$, момент достижения этого максимума - $t_1 = t_{i-1}$. Кроме того, определяется значение модуля сигнала рассогласования $|\varepsilon(t_1)|$ в момент t_1 .

Шаг 3. По полученным значениям $|\dot{\varepsilon}(t_1)|$, $|\varepsilon(t_1)|$ и t_1 производится подстройка коэффициента усиления ПИ, ПИД регулятора по формуле:

$$K_p^{(n+1)} = K_p^{(n)} \cdot \alpha \cdot \frac{|\dot{\varepsilon}(t_1)|}{|\dot{\varepsilon}(t_1)| \cdot t_1}, \quad (1)$$

где n – номер шага адаптации, α - эмпирический коэффициент, который задаёт качество переходного процесса. Диапазон изменения $\alpha = 1 \dots 1,8$. Рекомендуемое значение $\alpha = 1,44$.

На первом шаге адаптации используется начальное значение коэффициента усиления регулятора $K_p^{(0)}$, которое может быть определено с помощью инженерных методов.

Шаг 4. Сравнение нового значения коэффициента усиления регулятора $K_p^{(n+1)}$ с предыдущим $K_p^{(n)}$. Если модуль их разности меньше наперёд заданного значения Δ , то процесс подстройки заканчивается и в качестве оптимального значения общего коэффициента усиления считается его последнее значение - $K_p^{(n+1)}$, в противном случае необходимо повторить шаги 1-4 при новом значении коэффициента усиления $K_p^{(n+1)}$. Рекомендуемое значение $\Delta = 0,1$. Для достижения более высоких показателей качества необходимо уменьшить значение Δ .

Следует отметить, что данный алгоритм относится к классу алгоритмов однопараметрической подстройки. В данном случае корректируется лишь коэффициент усиления регулятора, а время интегрирования и время дифференцирования могут быть определены в начале процесса адаптации с помощью инженерных методик по априорным знаниям о объекте. Структурная схема алгоритма представлена на рис. 2.

При подаче тестового возмущения на вход объекта данный алгоритм может быть использован при $\alpha = 1,9 \dots 2,3$. Рекомендуемое значение $\alpha = 2,1$.

Предложенный алгоритм позволяет получить переходный процесс с 20% перерегулированием при изменении параметров объекта на $\pm 50\%$.

Кроме того, данный алгоритм может быть модифицирован для коррекции других параметров, в частности, времени интегрирования T_u . Тогда формула для коррекции выглядит следующим образом:

$$T_u^{(n+1)} = T_u^{(n)} \cdot \alpha \cdot \frac{|\dot{\varepsilon}(t_1)| \cdot t_1}{|\varepsilon(t_1)|} \quad (2)$$

При этом, аналогично как и для случая коррекции коэффициента усиления регулятора, коэффициент α выбирается в тех же пределах.

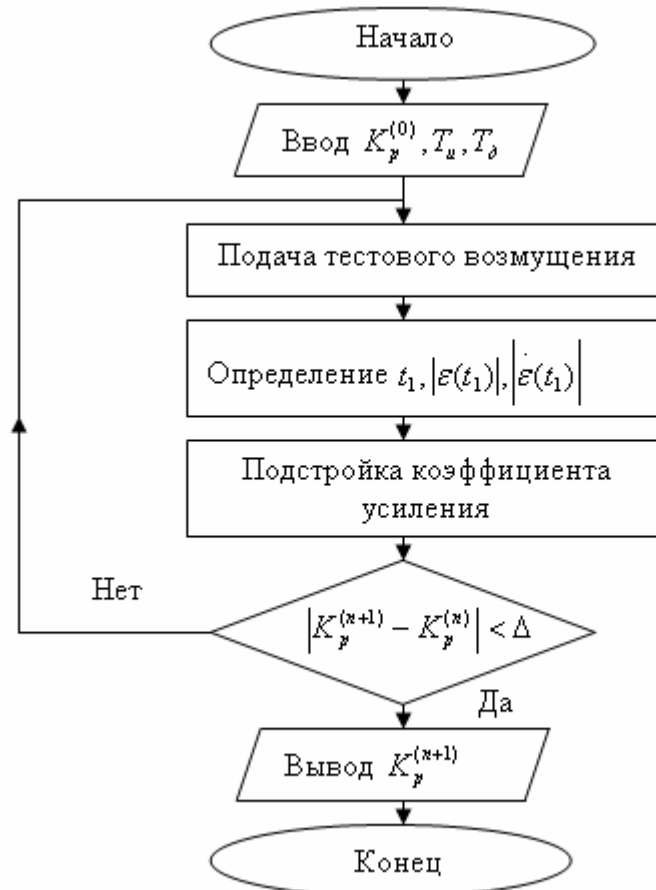


Рис. 2. Структурная схема алгоритма коррекции коэффициента усиления.

Настройка при подаче возмущения в разомкнутом контуре

Для получения высоких показателей качества при первичном включении системы в действие, разработан алгоритм определения начальных настроек регулятора. Для определения этих настроек необходимо подать тестовое возмущение на вход объекта в разомкнутой системе. В результате анализа кривой переходной характеристики на выходе объекта в момент t_1 (см. рис. 1) получим значения производной выходной величины $\dot{y}(t_1)$ и ко-

ээффициент усиления объекта $k_{об}$. По полученным значениям $k_{об}$ и $\dot{y}(t_1)$ определяем $k_p^{(0)}$, $T_u^{(0)}$, $T_d^{(0)}$ по следующим зависимостям:

$$k_p^{(0)} = \frac{0.5}{k_0}; T_u^{(0)} = 0.8 \cdot T_{об} = 0.8 \cdot \frac{k_{об}}{\dot{y}(t_1)}; T_d^{(0)} = 0.6 \cdot T_u^{(0)}, \quad (3)$$

где $k_p^{(0)}$ - начальное значение коэффициента усиления, $T_u^{(0)}$ - начальное значение времени интегрирования, $T_d^{(0)}$ - начальное значение времени дифференцирования.

Рассмотрим теоретическое обоснование зависимостей (3). Для определения $T_{об}$ необходимо провести касательную в точке перегиба переходной характеристики (рис. 1). Запишем уравнение прямой проходящей через точку перегиба:

$$y_1(t) - y(t_1) = k(t - t_1), \quad (4)$$

где k - угловой коэффициент прямой. Поскольку

$$k = \dot{y}(t_1), \quad (5)$$

тогда получим следующее уравнение прямой:

$$y_1(t) = \dot{y}(t_1) \cdot (t - t_1) + y(t_1). \quad (6)$$

Поскольку согласно рис. 1 $T_{об} = t_2 - t_0$, то для нахождения $T_{об}$ необходимо определить моменты времени t_2 и t_0 . Для определения t_0 необходимо $y_1(t)$ приравнять к 0. Получим:

$$0 = \dot{y}(t_1) \cdot (t_0 - t_1) + y(t_1) \rightarrow t_0 = -\frac{y(t_1)}{\dot{y}(t_1)} + t_1. \quad (7)$$

Для определения t_2 необходимо $y_1(t)$ приравнять к k_0 . Отсюда:

$$k_0 = \dot{y}(t_1) \cdot (t_2 - t_1) + y(t_1) \rightarrow t_2 = \frac{k_0 - y(t_1)}{\dot{y}(t_1)} + t_1. \quad (8)$$

$$\text{Тогда } T_{об} = t_2 - t_0 = \frac{k_0 - y(t_1)}{\dot{y}(t_1)} + t_1 + \frac{y(t_1)}{\dot{y}(t_1)} - t_1 = \frac{k_0}{\dot{y}(t_1)}. \quad (9)$$

Справедливость зависимости (3) теоретически обоснована.

Нечёткая коррекция по анализу показателей качества переходного процесса

Для построения нечёткого регулятора был разработан нечёткий алгоритм принятия решения, основанный на использовании скорости нарастания V_n и динамической ошибки d . Алгоритм предназначен для определения оптимальных настроек ПИ регулятора по имеющимся показателям качества регулирования (V_n и d). Значение переменных были описаны посредством нечётких подмножеств, функции принадлежности которых приведены в Табл. 1. Нечёткие множества имеют диапазон изменения: скорость нарастания $V_n \in [0; 0.6]$, динамическая ошибка $d \in [0; 2]$.

Таблица 1

Нечёткие подмножества скорости нарастания и динамической ошибки.

Нечеткое подмножество	Формула
V_n «низкая»	$trimf(x, -0.3, 0, 0.3) = \max\left(\min\left(\frac{x+0.3}{0+0.3}, \frac{0.3-x}{0.3-0}\right), 0\right)$
V_n «средняя»	$trimf(x, 0.1, 0.3, 0.5) = \max\left(\min\left(\frac{x-0.1}{0.3-0.1}, \frac{0.5-x}{0.5-0.3}\right), 0\right)$
V_n «высокая»	$trimf(x, 0.3, 0.6, 0.9) = \max\left(\min\left(\frac{x-0.3}{0.6-0.3}, \frac{0.9-x}{0.9-0.6}\right), 0\right)$
d «малая»	$gaussmf(x, 0.4, 0) = e^{-\left(\frac{x-0}{0.4}\right)^2}$
d «средняя»	$gaussmf(x, 0.4, 1) = e^{-\left(\frac{x-1}{0.4}\right)^2}$
d «большая»	$gaussmf(x, 0.4, 2) = e^{-\left(\frac{x-2}{0.4}\right)^2}$

Нечёткие значения выбирались следующим образом. Переменная V_n считается «низкая», если она меньше, чем 0.3, «средняя», если её значение находится в диапазоне [0.1;0.5], «высокая», если её значение находится в диапазоне [0.3;0.6]. Переменная d считается «малая», если она меньше, чем 1, «средняя», если её значение находится в диапазоне [0;1], «большая», если её значение находится в диапазоне [1;2].

Аналогично для выходных значений K_p, T_u определены функции принадлежности табл.2. Диапазон изменения: коэффициент усиления $K_p \in (0;8]$, время интегрирования $T_u \in (0;200]$.

Таблица 2

Нечёткие подмножества коэффициента усиления и времени интегрирования.

Нечеткое подмножество	Формула
K_p малый	$trimf(x, -2.1, 0, 2.1) = \max\left(\min\left(\frac{x+2.1}{0+2.1}, \frac{2.1-x}{2.1-0}\right), 0\right)$
K_p средний	$trimf(x, 0.9, 3, 5.1) = \max\left(\min\left(\frac{x-0.9}{3-0.9}, \frac{5.1-x}{5.1-3}\right), 0\right)$
K_p высокий	$trimf(x, 3.9, 6, 8) = \max\left(\min\left(\frac{x-3.9}{6-3.9}, \frac{8-x}{8-6}\right), 0\right)$
T_u малый	$trimf(x, -50, 0, 50) = \max\left(\min\left(\frac{x+50}{0+50}, \frac{50-x}{50-0}\right), 0\right)$
T_u средний	$trimf(x, 25, 75, 125) = \max\left(\min\left(\frac{x-25}{75-25}, \frac{125-x}{125-75}\right), 0\right)$
T_u высокий	$trimf(x, 100, 150, 200) = \max\left(\min\left(\frac{x-100}{150-100}, \frac{200-x}{200-150}\right), 0\right)$

Набор правил связывающих нечеткие отношения приведен ниже:

1. Если V_n «низкая» и d «малая», то « K_p » -«высокий», « T_u » - «высокий».
2. Если V_n «низкая» и d «средняя», то « K_p » -«средний», « T_u » - «высокий».

3. Если V_n «низкая» и d «большая», то « K_p » -«малый», « T_u » - «высокий».
4. Если V_n «средняя» и d «малая», то « K_p » -«высокий», « T_u » - «средний».
5. Если V_n «средняя» и d «средняя», то « K_p » -«средний», « T_u » - «средний».
6. Если V_n «средняя» и d «большая», то « K_p » -«малый», « T_u » - «средний».
7. Если V_n «высокая» и d «малая», то « K_p » -«высокий», « T_u » - «низкая».
8. Если V_n «высокая» и d «средняя», то « K_p » -«средний», « T_u » - «низкий».
9. Если V_n «высокая» и d «большая», то « K_p » -«малый», « T_u » - «малый».

WAR коррекция

В случае существенного изменения параметров объекта предложенные выше алгоритмы не могут обеспечить необходимых показателей качества. Для решения этой задачи авторами предложена WAR коррекция времени интегрирования T_u в комбинации с коррекцией коэффициента усиления K_p по анализу начального участка переходного процесса. WAR коррекция основана на использовании упорядоченных правил регулирования, которые действительны для выбранных характеристик и подобно нечёткому регулятору представляют базу знаний.

Введём переменные;

$$H(t) = \begin{cases} \varepsilon, & \text{если } \varepsilon(t) < 0, \\ 0, & \text{если } \varepsilon(t) \geq 0. \end{cases} \quad (10)$$

$$\Delta_{\text{дин}} = \begin{cases} y_{\text{зад}} - y_{\text{мин}}, & \text{если } e(t) > 0, \forall t \in (0; T), \\ 0, & \text{если } y(t) \geq y_{\text{зад}}, e(t) \leq 0, \forall t \in (0; T). \end{cases} \quad (11)$$

$$t_{\text{пез}} = t, \text{ если } |\varepsilon(t)| \leq 0.05, \forall t > t_{\text{пез}}. \quad (12)$$

Где $y_{\text{мин}}$ - минимальное значение y за время T , $y_{\text{зад}}$ - заданное значение выходной величины.

Правила, описывающие стратегию коррекции имеют вид:

$$\text{если } H(t) > 0, \Delta \leq 0 \quad \forall t \in (0; T), \text{ то } T_u^{m+1} = T_u^m - \beta \cdot H(T), \quad (13)$$

$$\text{если } H(t) \leq 0, \Delta > 0 \quad \forall t \in (0; T), \text{ то } T_u^{m+1} = T_u^m + \gamma \cdot \Delta_{\text{дин}}. \quad (14)$$

Величины β , γ , T определяются экспериментально для выделенного класса объектов и могут уточняться в процессе наладки. Критерием останова итерационного процесса является выполнение неравенств:

$$\left| k_p^{(n+1)} - k_p^{(n)} \right| \leq \varepsilon_1; \quad \left| T_u^{(m+1)} - T_u^{(m)} \right| \leq \varepsilon_2, \text{ где } n, m - \text{число шагов адаптации.}$$

Где T_u^m - значение времени интегрирования на m -ом шаге, T_u^{m+1} - значение времени интегрирования на $m+1$ -ом шаге, β и γ - весовые коэффициенты, ε_1 , ε_2 - наперед заданные точности вычислений.

Параметрическая оптимизация по заданному критерию

Предложенная стратегия решения, заключающаяся в нечёткой коррекции коэффициента передачи, в комбинации с поисковой оптимизацией интегрального критерия по времени интегрирования.

Математическая постановка задачи параметрической оптимизации имеет вид:

$$I = \int_{\alpha_H}^{\alpha_K} |\varepsilon| dt \rightarrow \min_{T_u}, \quad (15)$$

$$T_{об} \cdot \dot{y}(t) + y(t) = k_{об} \cdot u(t - \tau), u(t) = k_p \cdot (\varepsilon(t) + \frac{1}{T_u} \int \varepsilon(t) dt). \quad (16)$$

Ограничения:

$$\delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}, \quad (17)$$

где $y(t)$ – выход объекта, $T_{об}$ - постоянная времени объекта, $k_{об}$ - коэффициент передачи объекта, τ - транспортное запаздывание объекта, $u(t)$ - управление, $e(t) = y_{зад} - y(t)$, - сигнал рассогласования, k_p и T_u - параметры настройки регулятора, $y_{зад}$ - задание регулятору, δ - динамическая ошибка.

Вначале процесса коррекции производится определение нового значения коэффициента усиления регулятора $k_p^{(n+1)}$ по формуле:

$$k_p^{(n+1)} = \gamma_p \cdot k_p^{(n)}, \quad (17)$$

где γ_p - коэффициент коррекции, n – номер шага коррекции k_p .

Нечёткая коррекция коэффициента усиления k_p выполняется с использованием алгоритма логического вывода Mamdani. Для этого диапазон возможного изменения динамической ошибки δ ($\delta \in [0; \delta_{\max}]$) разбит на три нечётких подмножества. Для динамической ошибки δ выбраны функции принадлежности треугольной формы. Формулы и графики этих функций приведены в таблице 3 и на рис. 3 соответственно. Переменная δ «малая», если она меньше, чем δ_1 , «средняя», если её значение находится в диапазоне $[\delta_2; \delta_3]$, «большая», если её значение находится в диапазоне $[\delta_4; \delta_{\max}]$.

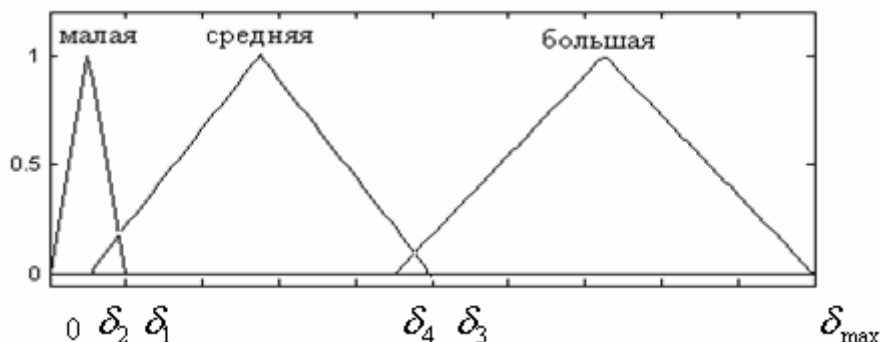


Рис. 3 Функции принадлежности динамической ошибки δ

Таблица 3

Нечёткие подмножества динамической ошибки δ .

Нечеткое подмножество	Функции принадлежности
Динамическая ошибка «малая»	$trimf(x, 0, \frac{\delta_1}{2}, \delta_1) = \max \left(\min \left(\frac{x + 0}{\frac{\delta_1}{2} + 0}, \frac{\delta_1 - x}{\delta_1 - \frac{\delta_1}{2}} \right), 0 \right)$
Динамическая ошибка «средняя»	$trimf(x, \delta_2, \frac{(\delta_2 + \delta_3)}{2}, \delta_3) = \max \left(\min \left(\frac{x - \delta_2}{\frac{(\delta_2 + \delta_3)}{2} - \delta_2}, \frac{\delta_3 - x}{\delta_3 - \frac{(\delta_2 + \delta_3)}{2}} \right), 0 \right)$
Динамическая ошибка «большая»	$trimf(x, \delta_4, \frac{(\delta_4 + \delta_{\max})}{2}, \delta_{\max}) = \max \left(\min \left(\frac{x - \delta_4}{\frac{(\delta_4 + \delta_{\max})}{2} - \delta_{\max}}, \frac{\delta_{\max} - x}{\delta_{\max} - \frac{(\delta_4 + \delta_{\max})}{2}} \right), 0 \right)$

Аналогично для коэффициента коррекции γ_p опеределён диапазон возможного изменения ($\gamma_p \in (0; \gamma_{p_{\max}}]$) и определены функции принадлежности. Формулы и графики этих функций приведены в таблице 4 и на рис. 4 соответственно. Значение величины коэффициента коррекции γ_p считается «малым» если оно находится в диапазоне $(0; \gamma_{p_1}]$, «средним» если оно находится в диапазоне $[\gamma_{p_2}; \gamma_{p_3}]$ и «большим» - если его значение находится в диапазоне $[\gamma_{p_4}; \gamma_{p_{\max}}]$. Для величины γ_p также были выбраны функции принадлежности треугольной формы.

Таблица 4

Нечёткие подмножества коэффициента коррекции γ_p .

Нечеткое подмножество	Функции принадлежности
γ_p «малый»	$\text{trimf}(x, 0, \gamma_{p_1}/2, \gamma_{p_1}) = \max \left(\min \left(\frac{x-0}{\gamma_{p_1}/2 - 0}, \frac{\gamma_{p_1} - x}{\gamma_{p_1} - \gamma_{p_1}/2} \right), 0 \right)$
γ_p «средний»	$\text{trimf}(x, \gamma_{p_2}, \gamma_{p_2} + \gamma_{p_3}/2, \gamma_{p_3}) = \max \left(\min \left(\frac{x - \gamma_{p_2}}{\gamma_{p_2} + \gamma_{p_3}/2 - \gamma_{p_2}}, \frac{\gamma_{p_3} - x}{\gamma_{p_3} - \gamma_{p_2} + \gamma_{p_3}/2} \right), 0 \right)$
γ_p «большой»	$\text{trimf}(x, \gamma_{p_4}, (\gamma_{p_4} + \gamma_{p_{\max}})/2, \gamma_{p_{\max}}) = \max \left(\min \left(\frac{x - \gamma_{p_4}}{(\gamma_{p_4} + \gamma_{p_{\max}})/2 - \gamma_{p_4}}, \frac{\gamma_{p_{\max}} - x}{\gamma_{p_{\max}} - (\gamma_{p_4} + \gamma_{p_{\max}})/2} \right), 0 \right)$

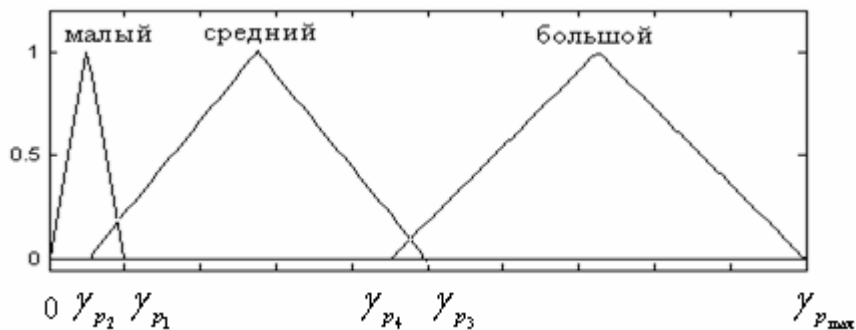


Рис. 4 Функции принадлежности коэффициента коррекции γ_p .

Для выполнения нечёткого вывода сформулирован следующий набор правил, связывающий динамическую ошибку δ и коэффициента коррекции γ_p :

1. Если δ «малая», то γ_p -«высокий»;
2. Если δ «средняя», то γ_p -«средний»;
3. Если δ «большая», то γ_p -«малый».

После выполнения коррекции коэффициента усиления k_p производится параметрическая оптимизация интегрального критерия I . Для решения этой задачи при фиксированном k_p , применяется метод координатного спуска [2, 3].

Предложенный алгоритм представлен ниже.

Шаг 1. Ввод $A, I^{(0)}$.

Шаг2. $h^{(0)} = A, k=0, p=0$.

Шаг3. $k = k + 1, T_u^{(k)} = T_u^{(k-1)} + h^{(p)}$.

Шаг4. Вычисление $I^{(k)}$ при $T_u^{(k)}$.

Шаг5. Если $I^{(k)} < I^{(k-1)}$, то переход на шаг3, иначе переход на шаг6.

Шаг6. $m = k, T_u^{(m)} = T_u^{(m-1)} - h^{(p)}$.

Шаг7. Вычисление $I^{(m)}$ при $T_u^{(m)}$.

Шаг8. Если $I^{(m)} < I^{(m-1)}$, то переход на шаг6, иначе переход на шаг9.

Шаг9. Если $h^{(p)} > \mathcal{G}$, то переход на шаг10, иначе - завершение процесса оптимизации.

Шаг10. $p = p + 1, h^{(p)} = \beta \cdot h^{(p-1)}$.

Шаг11. Переход на шаг3.

где h – величина приращения времени интегрирования T_u , \mathcal{G} - заданное минимальное значение приращения h , β - коэффициент коррекции величины изменения h , A - заданное начальное значение величины приращения h , k, m, p - счётчики итераций. Значение коэффициента A выбирается согласно табл. 5.

Таблица 5

Значение A в зависимости от $T_{об}$.

$T_{об}$, сек	A
$0 \div 10$	1
$10 \div 100$	10
$100 \div 1000$	100

Найденное значение T_u , при котором достигается минимум критерия I , используется для опеределения нового начального значения коэффициента усиления регулятора $k_p^{(0)}$ для уточнения с помощью нечёткого алгоритма коррекции. Далее аналогично описанным действиям производится попеременная подстройка коэффициента усиления регулятора k_p и времени интегрирования T_u до тех пор, пока в результате поочередной коррекции значение времени интегрирования T_u в результате оптимизации не отличается от значения этого времени найденного на предыдущем шаге оптимизации.

Внедрение предложенных алгоритмов

Часть из разработанных алгоритмов получили своё внедрение в промышленных АСУ ТП. В частности, однопараметрический алгоритм (1) с коррекцией по анализу начального участка переходного процесса был внедрен в программном обеспечении контроллеров компании “Раут-Автоматик” и используется для коррекции настроек ПИ закона регулирования в системах кондиционирования и горячего водоснабжения. Для подтверждения работы алгоритма приведем данные анализа адаптивной АСР калорифера системы вентиляции Киевской городской больницы “Феофания”. В результате исследования объекта регулирования было установлено, что коэффициент передачи $k_{об}$ и постоянная времени $T_{об}$ в зависимости от нагрузки может изменяться на $\pm 50\%$. Полученная передаточная функция объекта регулирования имеет вид:

$$W_{об}(p) = \frac{0.42 \cdot e^{-30 \cdot p}}{60 \cdot p + 1} \quad (18)$$

Начальные настройки адаптивного ПИ регулятора, обеспечивающие переходный процесс с 20% перерегулированием определены по зависимостям (3): $k_p^{(0)} = 2,27, T_u^{(0)} = 48$ сек.

После введения в действие АСР контур адаптации скорректировал эти настройки. Для этого понадобилось три шага адаптации коэффициента передачи, значения этих настроек следующие: $k_p^{(3)} = 1,51$, $T_u^{(0)} = 48$ сек. Проведя моделирование в Matlab6.5 при подаче возмущения по заданию, мы получили результаты представленные на рис. 5.

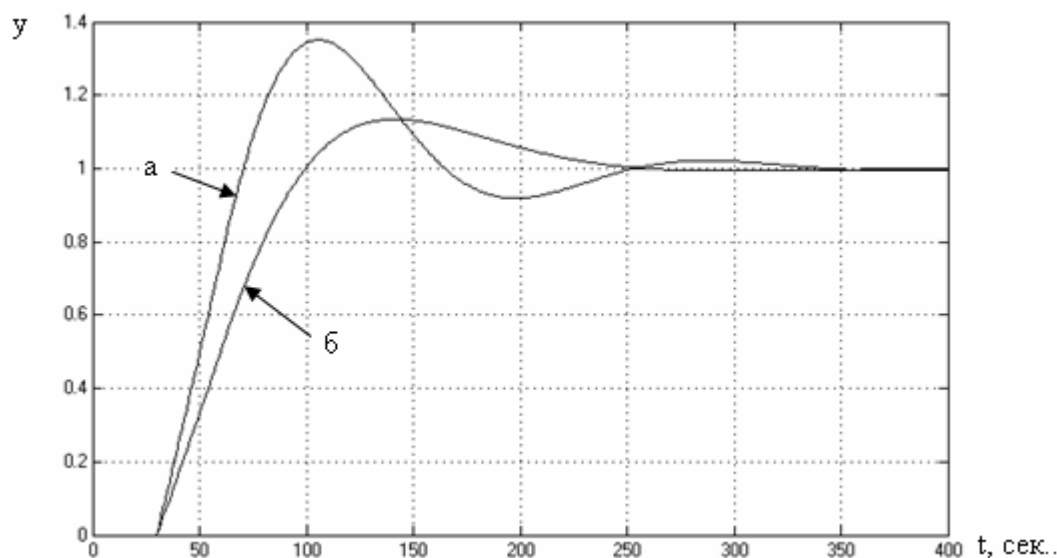


Рис. 5 Переходные процессы в замкнутой системе:

а – с начальными настройками регулятора; б – после трёх шагов адаптации.

Как видно на графике переходного процесса после адаптации рис.5.б, система регулирования обеспечивает процесс с 20% перерегулированием, что необходимо для оптимальной работы.

Выводы

1. Предложены алгоритмы коррекции по анализу начального участка с однопараметрической подстройкой, которые при изменении параметров объекта на $\pm 50\%$ позволяют получить переходный процесс с 20% перерегулированием.
2. В случае, если параметры объекта изменяются больше, чем на $\pm 50\%$ следует использовать одну из стратегий подстройки всех параметров регулятора: WAR-коррекция, нечёткая коррекция по анализу показателей качества переходного процесса в комбинации с параметрической оптимизацией по заданному критерию.
3. Для начальной настройки системы рекомендуется использовать алгоритм идентификации в разомкнутом контуре. Разработано алгоритмическое обеспечение для реализации этих подходов в случае ПИ, ПИД алгоритмов.

The techniques for building the self-tuned regulators of power engineering quasi-stationary objects are proposed. It consists in tuning of the coefficients of PI, PID algorithms. The results of modeling are presented. The operability of self-tuned regulators within wide range of the object parameters change is shown.

1. Белов В.В. «Разработка и исследование методов и схем беспоисковой оптимизации АСР в теплоэнергетике на основе анализа ошибки регулирования»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Иваново 1984г.
2. Методы оптимизации в теории управления: Учебное пособие/ И.Г. Черноруцкий. – С-Пб. : Питер, 2004. – 256с.:ил.
3. «Улучшение удаления азота из дымовых газов на комбинированных электростанциях с помощью нечёткого WAR-регулятора» - Техника регулирования, обзор АВВ 9/93.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЧЕТКОЙ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОНИТОРИНГА СЕТЬЮ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Михайленко В.С., Никольский В.В.

Современные котельные установки для обеспечения жилых домов и промышленных зданий отоплением и горячим водоснабжением оснащаются цифровыми средствами контроля и регулирования. Работа программируемых микроконтроллеров, как составной части, позволяет достичь оптимального поддержания заданных технологических параметров, экономии энергоресурсов, снизить влияние человеческого фактора, а также повысит надежность АСУТП. Развитие промышленных компьютерных систем и специализированного программного обеспечения существенно облегчает работу обслуживающего персонала. Вместе с тем новейшие SCADA системы (Genesis, Trace Mode, Круг и т.д.), на наш взгляд, с развитием области искусственного интеллекта, нуждаются в усовершенствовании. А именно, для повышения эффективности в управлении группой модульных или районных котельных, нами предлагается оснастить программные пакеты дополнительными функциями по выработке экспертных заключений, самостоятельной адаптации при изменении структуры котельной, а также производстве самонастройки и самообучения в нестандартных ситуациях. Наличие экспертной адаптивной системы с выше перечисленными функциями существенно уменьшит проблему по содержанию большого количества обслуживающего персонала и сведет вероятность отказов оборудования к минимуму.

В качестве выбора научного направления для разработки экспертной системы нами предлагается использовать опыт ученых, работающих в области нечеткого управления [1-3]. Известно, что нечеткие микроконтроллеры успешно имитируют действие эксперта-оператора при регулировании объектом в неопределенных условиях, там, где типовые регуляторы не достигают требуемого качества переходного процесса [4-5]. Оснащение фаззи-контроллеров дополнительным блоком адаптации (рис. 1) позволит, по нашему мнению, существенно повысить эффективность в управлении котельной установкой.

Целью данной работы является разработка нечеткого алгоритма для регулятора и его блока адаптации, а также компьютерная апробация нечеткой АСР с объектом 2-го порядка с запаздыванием (условная математическая модель водогрейного котла в виде инерционных звеньев) в условиях неопределенности (с вводом дополнительного звена и изменения значения передаточной функции, без изменения правил в базах знаний нечеткой АСР), которые позволят определить, насколько нечеткая система оказывается чувствительной к изменениям в структуре объекта в значительном диапазоне, и как будут отличаться её характеристики по сравнению с классическими регуляторами.

Впервые создание адаптивной нечеткой системы управления, которая производит коррекцию правил нечеткого регулятора исходя из информации о качестве процесса, было предложено Р. Алиевым, С. Ассилиани и Т. Просиком [1].

Так для поддержания заданного качества процессов управления при изменении параметров объекта, выходящих за допустимые пределы, и предотвращения аварийных ситуаций необходимо корректировать параметры регулятора, т. е. его базу знаний.

Система управления с адаптивным регулятором представляет собой двухуровневую систему с нечетким регулятором в цепи обратной связи и нечетким контуром адаптации на втором уровне. Принцип работы адаптивного нечеткого регулятора заключается в том, что при значительном изменении параметров объекта управления сложившейся текущей ситуации, определяемой e и e^* , база знаний выбирает действие, уже не обеспечивающее необходимое качество регулирования.

Получая информацию об изменении параметров объекта, содержащихся в ситуации

(e, e^*) , верхний контур формирует такую последовательность правил, которые приводят к желаемой переходной характеристике системы.

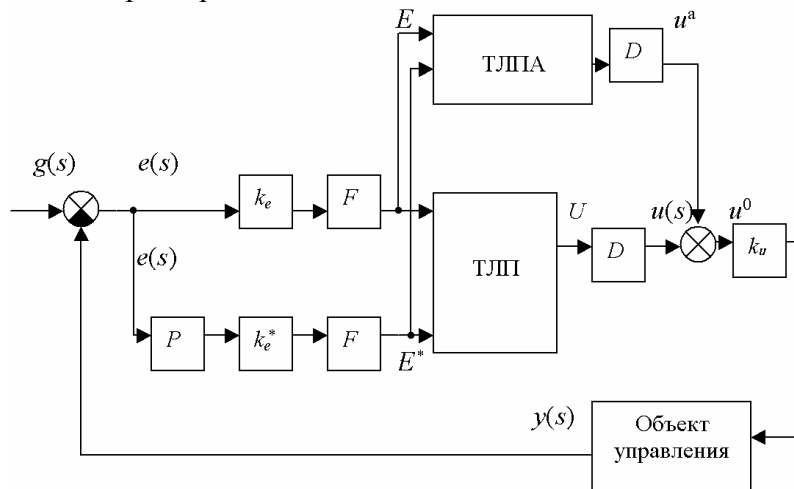


Рис. 1. Схема нечеткого адаптивного регулятора

На рис. 1 выходная переменная объекта регулирования технологического процесса $y(s)$ сравнивается с заданным значением $g(s)$, сигнал рассогласования $e(s)$ поступает в масштабный элемент с коэффициентом k_e и в дифференциатор P , вход которого умножается на k_e^* в масштабном элементе. Блоки F предназначены для преобразования текущих значений рассогласования и производной от рассогласования (скорости изменения рассогласования) в их лингвистические значения (фаззификации).

Нечеткие термы $e(s)^*$, $e^*(s)^*$ поступают в главный элемент нечеткого регулятора - базу знаний (БЗ) или ТЛП (таблицу лингвистических преобразований). База знаний (БЗ) строится на основе продукционной модели, имеющей конструкцию вида ЕСЛИ...ТО

Найденное лингвистическое значение управления после преобразования его в четкое значение $u(s)$ в блоке D (этап дефаззификации) и умножения на масштабный коэффициент k_u поступает на исполнительные устройства объекта управления. Масштабные коэффициенты k_e, k_e^*, k_u являются параметрами универсальных множеств E, E^* и U , на которых, исходя из условий конкретного управляемого объекта, определяются нечеткие множества $e(s)_1^*, e^*(s)_1^*, u(s)_1^*$. Например, если универсальным множеством E является диапазон $(-10, -9, \dots, +9, +10)$ и требуется, чтобы рассогласование в системе находилось в диапазоне $(-1; +1)$, тогда k_e берется равным $10,0$, с тем, чтобы нечеткий регулятор мог использовать всё универсальное множество, на котором определяются нечеткие множества.

Для нечеткого регулятора, представленного на рис. 1, любое правило в БЗ может быть представлено в виде:

ЕСЛИ ($e(s)$ есть $e(s)_1^*$) И ($e^*(s)$ есть $e^*(s)_1^*$) ТО ($u(s)$ есть $u(s)_1^*$), где $e(s), e(s)^*, u(s)$ - переменные; $e(s)_1^*, e^*(s)_1^*, u(s)_1^*$ - лингвистические значения переменных. Или ЕСЛИ ошибка e^* ПБ (положительно большая), И скорость изменения ошибки e^{**} ПБ, ТО переходный процесс системы удовлетворительный и адаптация не нужна ИНАЧЕ,

ЕСЛИ ошибка e^* ПМ (положительно малая), И скорость изменения ошибки e^{**} ПБ, ТО переходный процесс системы неудовлетворительный и необходима отрицательно средняя (ОС) адаптация управления u^a , или

$$R_k^a = E_i \times E_j \times U_e^a, \quad i = \overline{1, n_1}, j = \overline{1, n}, e = \overline{1, n}, k = \overline{1, n} \quad (1)$$

где R_k^a - нечеткое описание правила в пространстве $E_i \times E_j \times U_e^a$; E_i, E_j, U_e^a - соответственно, нечеткие подмножества ошибки, скорости изменения ошибки и адаптации управления.

Полученные нечеткие описания правил формируют матрицу нечетких отношений

(МНО):

$$R^a = R^a_1 \vee R^a_2 \vee \dots \vee R^a_k \vee \dots \vee R^a_{n4}, \quad k = \overline{1, n}. \quad (2)$$

Назначением матрицы R^a является выработка адаптирующего воздействия при выходе траектории переходного процесса за допустимые границы. Рядом ученых отмечено, что предполагаемая БЗ достаточно универсальна и может быть применима к объектам различного порядка [3].

Для программирования НР в (Simulink) проведены этапы фаззификации ошибки, скорости ее изменения и управляющего воздействия (рис. 2 - 4). Введены следующие обозначения: NB – отрицательно большая, NS – отрицательно средняя, NM – отрицательно малая, Z – нулевая, PM –положительно малая PS – положительно средняя, Pe – положительная большая.

Правила для нечеткого регулятора составлены в виде следующих высказываний:

ЕСЛИ $e(t)$ ОМ, И $e^*(t)$ ОМ, ТО $u(t)$ ОМ, ИНАЧЕ

ЕСЛИ $e(t)$ ОБ, И $e^*(t)$ ОБ, ТО $u(t)$ ОБ и т.д.

В основе их разработки лежит опыт известных ученых [2, 3, 5].

Для апробации полученной нечеткой системы управления, анализа ее работы в условиях неопределенности и сравнении с типовым ПИ-регулятором (PI- контроллер) проведен компьютерный эксперимент.

В качестве математической модели объекта для виртуального эксперимента нами выбрано инерционное звено второго порядка с запаздыванием (рис. 6) на основании [6]. Отметим, что желаемый вид переходного процесса можно получить в процессе выбора типа и количества функций принадлежности (терм-множеств). Их характеристики определяют размер БЗ, при этом, чем больше правил, тем успешнее может быть переходный процесс.

Как отмечалось выше, процедура адаптации управления заключается в корректировке некоторого правила из БЗ основного контура нечеткого регулятора, приведшего к текущей неудовлетворительной реакции объекта управления. Рассмотрим эту процедуру подробнее. Допустим, что некоторое правило из БЗ основного контура нечеткого регулятора явилось причиной текущего неудовлетворительного (по БЗ контура нечеткой адаптации) выхода объекта. Нечеткое описание этого правила составляет тензор:

$$R_{n-k} = E_{n-k} \times E_{n-k} \times U_{n-k}, \quad (3)$$

где $E_{n-k} = \overline{F} \{e_{n-k}\}$; $E^*_{n-k} = F \{e^*_{n-k}\}$; $U_{n-k} = F \{u_{n-k}\}$; n – индекс текущего времени опроса, k – определяется из динамики объекта; \overline{F} - оператор перехода от четкой переменной к нечеткой.

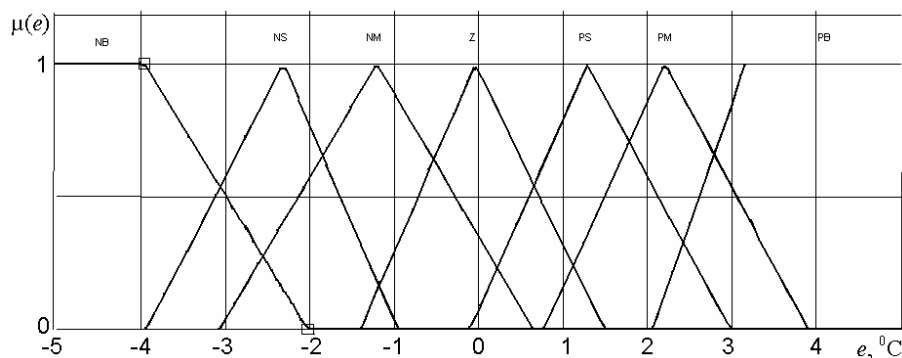


Рис. 2 Функции принадлежности лингвистической переменной “ошибка”

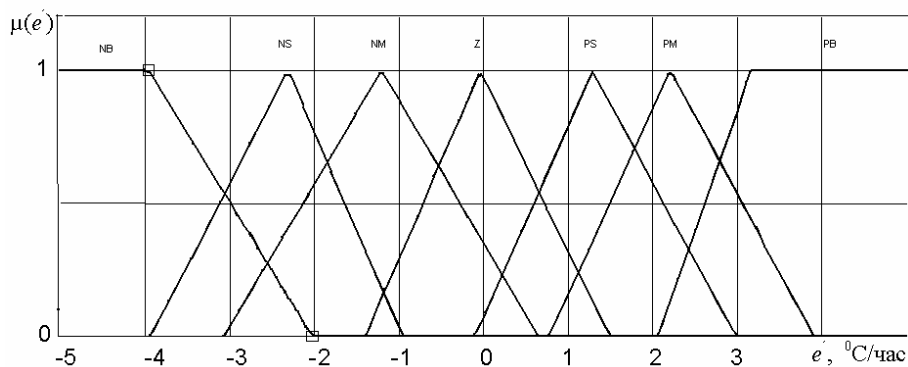


Рис. 3 Функции принадлежности лингвистической переменной "скорость изменения ошибки"

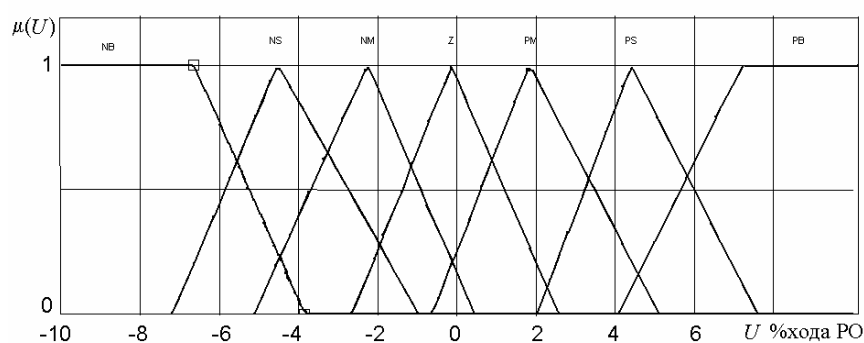


Рис. 4 Функции принадлежности выхода НР

Текущая неудовлетворительная реакция объекта была установлена некоторым правилом из ТЛП (таблицы лингвистических правил) контура адаптации, нечеткое описание которого также составляет тензор:

$$R_n^a = E_n \times E_n \times U_n^a \quad (4)$$

Очевидно, что неудовлетворительное правило должно быть заменено скорректированным:

$$R' = E_{n-k} \times E_{n-k}^* \times U^H, \quad (5)$$

где $U^H = F \{u_{n-k} + u_n^a\}$.

Таким образом, в БЗ основного контура будет занесено новое правило, которое для текущих параметров объекта управления предпочтительнее. Для решения вопроса адаптации управления, соответствующего неудовлетворительному правилу, представляется целесообразным использовать четкое значение U_n^a в соответствии со следующим алгоритмом:

$$u^0 = u_n + u_n^a, \quad (6)$$

где $u_n = D \{U_n\}$; $u_n^a = D \{U_n^a\}$; D – оператор перехода от нечеткой переменной к четкой (дефаззификация).

База знаний контура нечеткой адаптации состоит из 49 правил. Апробация адаптивной нечеткой системы (рис. 5) по каналу задания ($g(s)=2,5$) показала, что переходный процесс на выходе адаптивного НР рис. 6, а имеет затухающий вид.

В качестве проверки нашего утверждения об эффективности адаптивной нечеткой системы (АНС) в условиях неопределенности был проведен второй компьютерный эксперимент. Было изменено значение времени интегрирования инерционного звена передаточной функции объекта. Кроме того, во втором эксперименте было добавлено инерционное звено. Таким образом, был увеличен порядок объекта (рис. 5) с помощью переключателя (Manual switch). Анализ переходных процессов АСР (рис. 6, б) показал, что нечет-

кий контроллер успешно поддерживает заданное значение в отличие от PI – контроллера, переходный процесс которого является расходящимся. Затухающий процесс получен с выхода адаптивного НР. Таким образом, можно сделать вывод, что в условиях стационарности оба регулятора демонстрируют хорошие характеристики.

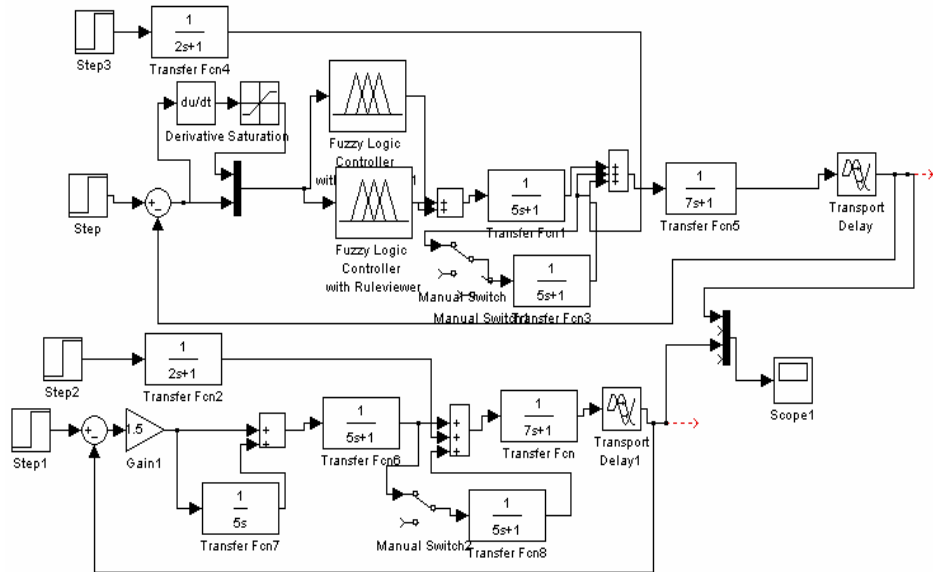


Рис. 5 Структурные схемы нечеткой адаптивной и типовой АСР

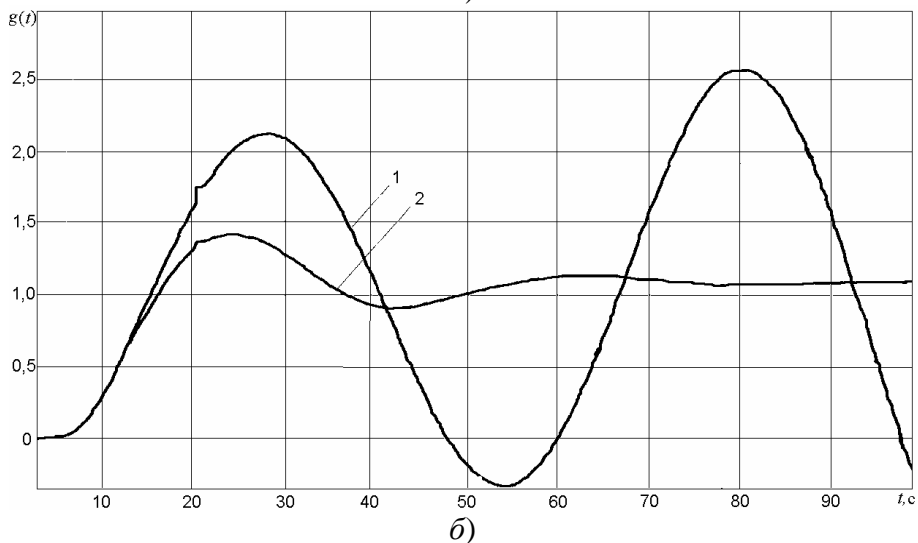
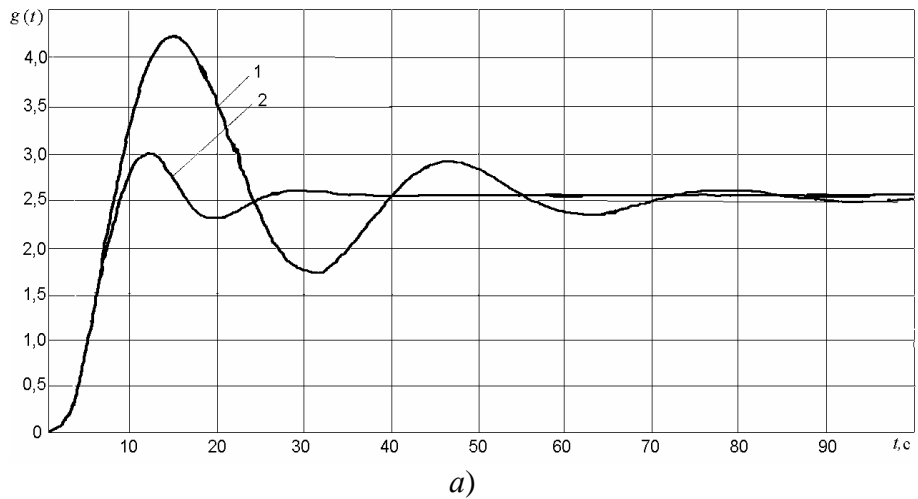


Рис. 6 Переходные процессы нечеткой и типовой АСР: а - без звена запаздывания, б - со звеном запаздывания, 1 – ПИ - регулятор, 2 - нечёткий регулятор

Показатели качества переходных процессов ПИ и нечеткого регуляторов (рис. 6, а) представлены в таблице 1 и демонстрируют преимущества нечеткого контроллера.

А переходный процесс типовой АСР (рис. 6, б) - расходящийся, т.е. система неустойчива. В тоже время нечеткий контроллер показывает удовлетворительные характеристики, а его процесс носит апериодический характер ($T_p = 80$ с; $g_1(t) = 1,4$).

Таблица 1

Показатели качества процессов регулирования		
показатели	регуляторы	
	ПИ	нечеткий
T_p, c	85	38
ψ	0,64	0,86
$g_1(t)$,	4,5	3

Дальнейшее использование нечетких адаптивных систем регулирования и их встроенная поддержка в SCADA – системы, например TraceMode, позволит эффективно управлять сложным отопительным оборудованием в экономных режимах. Следует отметить, что успешное развитие, в последнее время, адаптивных нейронных нечетких сетей (ANFIS) позволяет производить самообучение системы управления без участия эксперта.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- применение нечетких АСР позволяет использовать их для управления информацией качественного характера, при этом нечеткая система оказываются малочувствительной к изменениям в структуре объекта в значительном диапазоне и демонстрируют лучшие характеристики по сравнению с классическими регуляторами;
- значительное изменение параметров объекта управления влечет за собой модификацию управляющих правил БЗ с их последующей корректировкой, что успешно производит адаптивный контур нечеткого регулятора.

The article deals with application of adaptive fuzzy systems control for computer monitoring of boilers equipments. The effects of investigation is elaboration of fuzzy algorithms which have effective regulation in indefinite conditions

1. Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. - М.: Энергоиздат, 1991. – 234 с.
2. Леоненков А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech. - СПб.: БХВ, 2003. — 720 с.
3. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта //Под. ред. Д.А. Поспелова. - М.: Радио и связь, 1982. - 490 с.
4. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения // Под ред. Р.Р. Ягера. - М.: Радио и связь, 1986. - 408 с.
5. Борисов А.Н., Алексеев А.В., Меркурьева Г.В. и др. Обработка нечеткой информации в системах принятия решений. - М: Радио и связь, 1999. - 304 с.
6. Дудников Е.Г. Экспериментальное определение динамических характеристик промышленных объектов управления. - М.: Энергия, 1987. – 367 с.

УДК 681.513.6

РЕШЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

Шеховцов А.В., Крючковский В.В., Мельник А. Н.

Введение. В процессе управления сложными техническими и организационно-техническими системами необходимо постоянно принимать непростые решения, связанные с учетом многих критериев протекания каких либо производственных процессов и ограничений на ресурсы. Если такие решения принимать с использованием только интуиции и опыта руководителя, то будет достаточно сложно сделать оптимальный выбор. В этой связи необходимо разрабатывать и внедрять формализованные методы поддержки принятия решений.

Формальные математические модели принятия решений в настоящее время все более полно отражают сложность реальных практических проблем, что, с одной стороны, делает их более адекватными реальным системам, а с другой – приводит к необходимости решать все более сложные задачи оптимизации. Основные свойства задач оптимизации – наличие многих критериев, существенных ограничений, переменных разных шкал и алгоритмически заданных функций – делают невозможным применение традиционных методов. Выходом из такой ситуации является использование адаптивных стохастических алгоритмов, успешно преодолевающих указанные трудности.[1]

При исследовании проблемы многокритериальности часто все критерии, кроме одного, выбранного доминирующим критерием, принимались в качестве ограничений, и оптимизация проводилась по доминирующему критерию. Такой подход к решению практических задач значительно снижает эффективность принимаемых решений.

Постановка задачи многокритериальной оптимизации при общей многокритериальной (векторной) оптимизации планирования и подходы к ее решению представлены в статье.

Пусть $\max f_1(x)=F_1$, $\max f_2(x)=F_2$, $\max f_k(x)=F_k$, при $x \in X$,

где: X – множество допустимых значений переменных x ;

k – число целевых функций (критериев);

F_i – значение i -го критерия (целевой функции),

“max” – означает, что данный критерий нужно максимизировать.

Одним из наиболее часто применяемых в такой обстановке подходов являются эволюционные алгоритмы, представляющие собой стохастические оптимизационные процедуры, имитирующие процессы естественной эволюции, в частности – генетические алгоритмы (ГА). Алгоритмическое задание функций и разные шкалы переменных не представляют дополнительных трудностей для ГА, которые работают с бинарными представлениями решений и не требуют информации о свойствах целевых функций [2]. Наличие многих критериев и ограничений затрудняют применение ГА в практических задачах, т.к. большинство подходов, предложенных в области эволюционной оптимизации, ориентированы только на одну проблему, т.е. либо на многокритериальность, либо на наличие ограничений. Подходы, сочетающие оба направления, встречаются редко, и их эффективность требует дополнительных исследований и не всегда удовлетворительна.

Совершенствование существующих и разработка новых эффективных адаптивных поисковых алгоритмов условной многокритериальной оптимизации является актуальной научной задачей.

Решение проблемы заключается в совершенствовании эволюционных алгоритмов поддержки принятия многокритериальных решений при управлении сложными системами.

Поставленная цель потребовала решения следующего комплекса взаимосвязанных задач:

- На основе анализа классических подходов к решению задач многокритериальной оптимизации выявить области их недостаточной эффективности по сравнению с эволюционным подходом к решению задач данного класса.

- Провести сравнительный анализ эффективности существующих методов многокритериальной оптимизации генетическими алгоритмами целью выявления наиболее перспективного подхода и направления его совершенствования.

- Разработать модифицированные адаптивные поисковые алгоритмы решения многокритериальных задач условной и безусловной оптимизации, более эффективно решающие сложные задачи, и оценить их эффективность.

- Исследовать различные варианты предложенного подхода с целью выявления наиболее эффективной процедуры поиска оптимальных решений условных многокритериальных и безусловных задач.

Разработан новый гибридный алгоритм решения многокритериальных задач безусловной оптимизации, отличающийся от известных организацией взаимодействия локального и эволюционного поиска и позволяющий строить представительную аппроксимацию множества и фронта Парето. Предложен модифицированный гибридный алгоритм решения многокритериальных задач условной оптимизации, отличающийся от известных способом учета существенных ограничений и позволяющий эффективно решать сложные задачи оптимизации. Предложены модифицированные математические модели оптимизации планирования работы транспортного предприятия, отличающиеся от известных наличием нескольких критериев оптимизации и использованием смешанных переменных.

Проведем сравнительный анализ эффективности классических подходов к решению многокритериальных задач оптимизации, покажем эффективность использования эволюционного подхода для решения задач рассматриваемого класса. Проведем сравнительный анализ эффективности методов многокритериальной оптимизации генетическими алгоритмами при решении тестовых задач, на основе которого выявлен наиболее перспективный подход.

Традиционные методы многокритериальной оптимизации можно условно разделить на три ключевых подхода:

- Первый связан с идеей ранжирования критериев по важности и последовательности дальнейшей оптимизации каждого критерия по отдельности с назначением допустимой величины изменения значения критерия, полученного на предыдущем шаге.

- Второй подход состоит в выделении из всех критериев главного критерия, а затем и оптимизации его и переводе остальных в ограничения.

- Третий подход – скаляризация векторного критерия в один обобщенный критерий.

Основной проблемой, касающейся большинства традиционных методов, является необходимость прогонять алгоритм несколько раз для получения репрезентативной аппроксимации множества эффективных точек (число итераций равно мощности предполагаемой аппроксимации множества Парето). Это и само по себе не очень удобно при решении практических задач, однако имеется и еще более существенный недостаток – получаемая аппроксимация множества не доминантных решений может оказаться нерепрезентативной, т.к. генерируемые эффективные точки будут неравномерно распределены как в пространстве альтернатив, так и в пространстве критериев. Зачастую можно получить набор очень близких друг к другу решений при потенциально бесконечном множестве Парето. Основной причиной такой ситуации является то, что в каждом из них задача многокритериальной оптимизации сводится к одной или нескольким задачам однокритериальной оптимизации. Таким образом, теряется суть решаемой задачи – одновременный учет многих критериев.

В отличие от классических подходов к многокритериальной оптимизации, генетические алгоритмы (ГА) принадлежат к разряду многоточечных поисковых методов. Задача

оптимизации с их помощью может быть решена даже в случае полимодального характера целевых функций. Более того, они также применимы к задачам с дискретным поисковым пространством. При решении многокритериальных задач генетические алгоритмы способны находить Парето как оптимальное множество за один прогон, благодаря заложенному в них полимодальному поиску. Однако для обеспечения репрезентативной аппроксимации необходимо принимать специальные меры.

Общая схема эволюционного алгоритма многокритериальной оптимизации приведена ниже. Существующие подходы отличаются способами реализации различных шагов (главным образом второго и третьего).

Пусть N – размер популяции ГА, T – максимальное число поколений, p_c – вероятность скрещивания, p_m – вероятность мутации, I – текущая популяция, A – не доминантное множество.

1. Инициализация: положить $P_0 = \emptyset$ (начальная популяция), $t=0$ ($t=1, \dots, T$) и для $i=1, \dots, N$ выполнить:

- а) выбрать индивид $i \in I$,
- б) добавить индивид i к множеству P_0 ($P_0 = P_0 + \{i\}$).

2. Назначение пригодности: для каждого индивида $i \in P_t$ (текущая популяция) определить закодированный вектор $x = m(i)$ и вектор целей $y = f(x)$, вычислить скалярное значение функции пригодности $F(i)$.

3. Селекция: положить $P' = \emptyset$ и для $i=1, \dots, N$ выполнить:

а) выбрать индивид $i \in P_t$ согласно заданной схеме селекции и основываясь на его пригодности $F(i)$,

- б) добавить индивид i к множеству $P' = P' + \{i\}$.

4. Рекомбинация (скрещивание): положить $P'' = \emptyset$ и для $i=1, \dots, N/2$ выполнить:

- а) выбрать двух индивидов $i, j \in P'$ и удалить их из P' ,
- б) осуществить скрещивание индивидов i и j , в результате получатся потомки $l, k \in I$,

в) добавить к P'' индивиды l и k с вероятностью p_c или индивиды i и j с вероятностью $(1 - p_c)$.

5. Мутация: положить $P''' = \emptyset$ и для каждого $i \in P''$ выполнить:

- а) мутация индивида i с вероятностью p_m , в результате получится индивид $j \in I$,
- б) добавить индивид j к множеству $P''' = P''' + \{j\}$.

6. Завершение: положить $P_{t+1} = P'''$ и $t = t+1$, если $t \geq T$, из последней популяции отбираются не доминантные индивиды, т. е. получается результирующее множество $A = P(m(P_t))$, иначе переходим на 2 этап.

Исследуем четыре наиболее распространенных метода, реализующих различные схемы назначения пригодности и селекции.

Метод **VEGA** (Schaffer, 1985) использует селекцию по переключающимся целевым функциям, т.е. селекция производится по пригодности индивидов относительно каждого из K критериев в отдельности. Тем самым промежуточная популяция заполняется равными порциями индивидов, отобранных по каждому из частных критериев.

Метод **FFGA** (Fonseca and Fleming, 1993) использует основанную на Парето-доминировании процедуру ранжирования индивидов, где ранг каждого индивида определяется числом доминирующих его индивидов, т.е. пригодность определяется не значениями целевых функций, а рангом каждого индивида в популяции.

В методе **NPGA** (Horn, Nafpliotis and Goldberg, 1994, В.Р. Гарипов, 1998) этап назначения пригодности заменяется модифицированной схемой деления пригодности с использованием понятия ниши, которая определяется для индивидов в пространстве альтернатив или целевых функций и обеспечивает возможность поддержания разнообразия, позволяя получить представительное множество Парето.

Метод **SPEA** (Zitzler and Thiele, 1998, В.М. Клешков, 2002) создает внешнее множество, в котором хранятся индивиды, не доминантные относительно других членов по-

пуляции и представляющие в итоге не доминантный фронт. Число индивидов во внешнем множестве регулируется с помощью кластерного анализа. Назначение индивидам скалярного значения пригодности в методе SPEA осуществляется только относительно индивидов внешнего множества, участвующих в селекции наравне с другими членами популяции. При этом, как и в методе FFGA, используется концепция Парето-доминирования.

Эффективность подходов исследовалась на представительном множестве тестовых задач, среди которых были двух-, трех- и четырехкритериальные задачи с разнообразными целевыми функциями – квадратичными, овражными (Розенброка), многоэкстремальными (Растргина), с различным количеством переменных – от двух до двадцати. Анализ эффективности работы методов проводился на основании сравнения качества аппроксимации множества Парето и Парето - оптимального фронта по следующим показателям: равномерность распределения генерируемых решений, степень покрытия множества, количество доминируемых решений в итоговой популяции.[3]

Разработка конкретного эволюционного алгоритма требует учета специфики решаемой задачи – эволюционные алгоритмы испытывают значительные трудности при необходимости учета существенных ограничений на объектные переменные и усложняются при оптимизации нескольких критериев. Присутствие в одной задаче одновременно этих двух трудностей делает задачу разработки эффективного эволюционного алгоритма особенно трудной. Проведенный в статье анализ эффективности эволюционных алгоритмов на классах задач показал, что трудности, связанные с учетом ограничений и присутствием нескольких критериев, сопоставимы по масштабам, поэтому перспективным подходом является модификация задачи, оставляющая только один из этих аспектов. В данной статье предлагается перевести ограничения в критерии (минимизируя степень их нарушения) и решать многокритериальную задачу безусловной оптимизации. Вторая возможность (перевести критерии в ограничения) не упрощает ситуацию, но делает модель менее адекватной реальной ситуации.

Проведенные исследования показали, что, при введении ограничений в постановку, задача выбора оптимальных решений значительно усложняется, а эффективность методов снижается. При этом основные трудности вызывает именно учет ограничений, так как в результате решения многокритериальной задачи условной оптимизации очень большое количество итоговых не доминантных точек не принадлежит допустимой области.

В более сложных задачах ситуация, анализируемая по числовым характеристикам аппроксимации множества Парето, выглядит аналогично.

Анализ эффективности эволюционных алгоритмов в задачах условной и безусловной оптимизации показал необходимость совершенствования эволюционных алгоритмов многокритериальной оптимизации.

Для устранения обнаруженного недостатка метода SPEA предложен гибридный эволюционный алгоритм многокритериальной оптимизации, эффективно сочетающий эволюционный алгоритм (SPEA) и паретовский локальный поиск. Паретовский локальный поиск (ПЛП) представляет собой оригинальный метод локального спуска в пространстве бинарных переменных с переходом по первому улучшению с тем существенным отличием, что сравнение соседних точек проводится в соответствии с принципом Парето, т.е. переход в соседнюю точку осуществляется, если она доминирует текущую по совокупности критериев.

Для преодоления компактных множеств псевдо-недоминируемых точек в алгоритме предусмотрена специально разработанная процедура выхода из множества постоянства.

После исчерпывающего анализа всевозможных схем гибридизации была выбрана наилучшая схема: локальный поиск включается в конце работы алгоритма SPEA, осуществляя "лечение" не доминантных точек. При этом паретовские точки не могут быть улучшены, а остальные переводятся локальным поиском в область Парето.[3] После этого проводится кластерный анализ и лишние точки, образующие сгустки, удаляются. Полу-

чаемая в результате аппроксимация множества Парето является репрезентативной – точки равномерно распределены, сгущения отсутствуют, доминируемых точек нет.

Типичный пример результата, получаемого гибридным алгоритмом, приведен на рис. 1. Для большей наглядности представлена задача трехкритериальной оптимизации квадратичных функций.

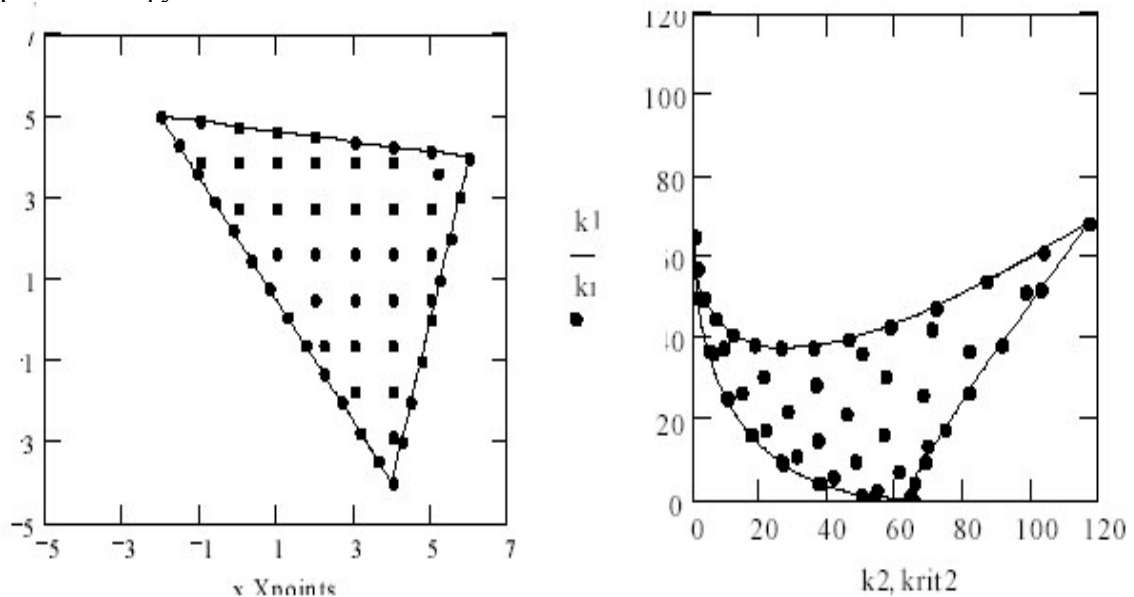


Рис.1 Множество Парето и фронт Парето, полученные гибридным алгоритмом

Заключение. Результаты решения тестовых задач предложенным алгоритмом позволяют сделать вывод об успешности выполненной модификации – точки расположены практически равномерно и по всему множеству, доминантных решений нет. Разумеется, в реальных задачах трудно ожидать похожей эффективности, но очевидно преимущество предложенного подхода над существующими алгоритмами.

В качестве базового алгоритма решения условных задач многокритериальной оптимизации был выбран разработанный выше гибридный эволюционный алгоритм, который и исследовался на эффективность на тестовых задачах. Хотя результаты, полученные гибридным алгоритмом, оказались лучше, чем у обычных эволюционных алгоритмов многокритериальной оптимизации, включая SPEA, они, тем не менее, не были в полной мере удовлетворительными. Поэтому далее были выполнены исследования по выбору наиболее эффективной схемы сочетания паретовского локального поиска и SPEA.

Как было установлено, наилучшие результаты дает следующая схема гибридного адаптивного алгоритма. 85% от общего заданного числа поколений (выделенного на оптимизацию ресурса) преобразованная многокритериальная задача оптимизации решается с использованием гибридной схемы SPEA+ПЛП. Оставшуюся часть времени (15% ресурса) решается задача оптимизации без учета целевых функций исходной задачи, т.е. поиск решения проводится только по функциям-ограничениям, что приводит большую часть популяции в допустимую область, хотя и с некоторой потерей качества по исключенным критериям.

На следующем этапе работы алгоритма осуществляется "лечение" недопустимых решений с помощью обычного локального поиска (ЛП) - минимизация степени нарушения всех ограничений. В результате такого "лечения" все индивиды популяции становятся допустимыми по функциям-ограничениям.

На последнем этапе работы алгоритма индивиды улучшаются с помощью ПЛП по всем критериям. Так как допустимые индивиды не могут доминироваться недопустимыми индивидами, улучшение происходит только по целевым функциям исходной задачи. При

этом ППП включает просмотр соседних, двух соседних и трех соседних точек окрестности для преодоления множеств постоянства.

Структурная схема описанного выше алгоритма решения условной многокритериальной задачи изображена на рис. 2. В подчеркнутых предложениях показаны начальные/конечные или промежуточные данные, имеющиеся на том или ином шаге алгоритма, к которым применяются определенные операции, изображенные выделенным курсивом.

Исходная многокритериальная задача условной оптимизации

Преобразование

Безусловная многокритериальная задача

Решение гибридным методом SPEA+ППП (85% ресурса)

Промежуточная популяция точек-решений

Решение гибридным методом SPEA+ППП без учета целевых функций (15% ресурса)

Точки-решения после останова алгоритма

«Лечение» недопустимых точек с помощью ЛП

Решение многокритериальной задачи – недоминируемое множество

Улучшение допустимых точек-решений с помощью ППП

Результат – решение условной задачи

Рис. 2 – Схема адаптивного поискового алгоритма

Нетрудно видеть, что предложенный алгоритм намного большего количества вычислений функций задачи, чем обычные эволюционные алгоритмы. Однако если предоставить эволюционным алгоритмам гибридный алгоритм требует данное количество ресурса, они все равно не могут улучшить свою эффективность в смысле репрезентативности аппроксимации множества и фронта Парето, т.е. дополнительные затраты не приводят к улучшению конечного результата. Сравнение с мультистартом паретовского локального поиска тоже показало преимущество предложенного гибридного алгоритма.

The new hybrid algorithm, for the decision многокритериальных problems(tasks) of the unconditional optimization is offered to consideration, distinguished from known algorithms the organization of interaction of local both evolutionary search and allowing to build representative approximation of set and front Pareto.

1. Сигал И.Х., Иванова А.П. Введение в прикладное дискретное программирование: модели и вычислительные алгоритмы. Учебное пособие. – М.: Физматлит, 2002.
2. Dasgupta D. Optimisation in Time-Varying environments using Structured Genetic Algorithms, Technical Report No IKBS-17-93, Dec. 1993.
3. Beyer, Schwefel, Wegener. How to Analyse Evolutionary Algorithms, Technical Report No.CI-139/02. -- University of Dortmund, Germany, 2002.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА, КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 648.058.602.23

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОГО БИКОНИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ СВЧ-УСТРОЙСТВ ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

Черевко О.И., Ефремов Ю.И., Одарченко А.М., Одарченко Д.М, Агафонова Ю.Ю.

В Украине наметилась положительная тенденция использования СВЧ-энергии при переработке растительного сырья. Это обусловлено, прежде всего, преимуществами этого подвода энергии, которая позволяет сократить продолжительность технологической обработки, что приводит к снижению расходов топливно-энергетических ресурсов, отсутствия образования канцерогенных веществ, благоприятные санитарно-гигиенические условия работы для персонала и снижению потерь массы при обработке за счет равномерного распределения температурного поля. В этой связи теоретическое обоснование основных характеристик основного конструктивного элемента СВЧ-устройств резонаторов стоит особо остро. Поэтому основной целью статьи является проведение расчета полей в биконическом резонаторе и проведения контроля над диэлектрическими характеристиками растительного сырья, что повысит добротность резонаторов, что, соответственно, резко повысит технологичность в проведении процесса.

Приводим решение предложенной выше математической модели для биконического резонатора, то есть резонатора, центральная часть которого является цилиндром, а торцы – усеченными конусами (рис. 1).

Область II описывается цилиндрическими координатами, поэтому в этой части резонатора можно представить в виде:

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi^{II}}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi^{II}}{\partial \varphi} \right) \right] + \frac{\partial^2 \psi^{II}}{\partial z^2} + k^2 \psi^{II} = 0 \quad (1)$$

где ψ^{II} – продольная электрическая (поперечная магнитная) или продольная магнитная (поперечная электрическая) скалярная функция в центральной части II.

Уравнение 1 решается с помощью метода разделения переменных. Предположим, что

$$\psi^{II} = P(r) \cdot \Phi(\varphi) \cdot Z(z), \quad (2)$$

где r, φ, z – текущие координаты цилиндрической системы.

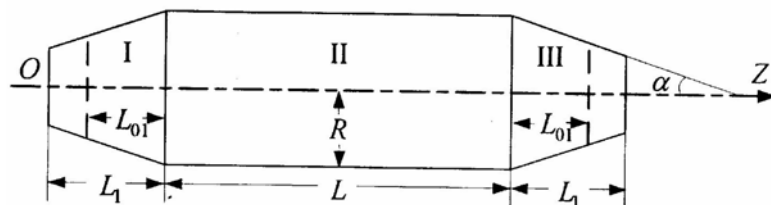


Рис. 1 Схематическое изображение биконического резонатора

Подставим (2) в (1):

$$\frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) \Phi \cdot Z + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} \right) P \cdot Z \right] + \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} P \cdot \Phi + k^2 P \cdot \Phi \cdot Z = 0. \quad (3)$$

Разделив выражение (3) на (2) получаем три независимых уравнения для каждой из неизвестных функций $P(r)$, $\Phi(\varphi)$ и $Z(z)$:

$$\frac{d^2 P}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dP}{dr} + \left[(\kappa^{\text{II}})^2 - \frac{m^2}{r^2} \right] P = 0, \quad (4)$$

$$\frac{d^2 \Phi}{d\varphi^2} + m^2 \Phi = 0, \quad (5)$$

$$\frac{d^2 Z}{dz^2} + (\beta^{\text{II}})^2 Z = 0. \quad (6)$$

Как известно, решением дифференциального уравнения (4) являются функции Бесселя первого $J_m(\kappa^{\text{II}} r)$ и второго $N_m(\kappa^{\text{II}} r)$ рода

$$P(r) = A_1 \cdot J_m(\kappa^{\text{II}} r) + A_2 \cdot N_m(\kappa^{\text{II}} r), \quad (7)$$

где m - число, определяющее порядок данных функций.

Поскольку решение на оси резонатора должно быть конечным, необходимо, учитывая поведение функции Бесселя второго рода при стремящемся к нулю ее аргументе, коэффициент A_2 положить равным нулю. Тогда

$$P(r) = A_1 \cdot J_m(\kappa^{\text{II}} r), \quad (8)$$

где κ^{II} – волновое число.

Дифференциальное уравнение (5) имеет решением функцию

$$\Phi = A_3 \cdot \cos(m \cdot \varphi) + A_4 \cdot \sin(m \cdot \varphi), \quad (9)$$

где m - тоже число, что и в (8).

Выбирая соответствующим образом начало отсчета координаты φ , можно получить $A_4 = 0$. Таким образом,

$$\Phi = A_3 \cdot \cos(m \cdot \varphi). \quad (10)$$

Учитывая, кроме того, что при изменении угла φ на 2π радиан должно быть получено то же самое распределение электромагнитного поля, можно сделать вывод, что m - целое число.

Из уравнения (6) следует, что

$$Z = A_5 e^{-j\beta^{\text{II}}(z-L_1)} + A_6 e^{j\beta^{\text{II}}(z-L_1)}, \quad (11)$$

где β^{II} – продольное волновое число в области II резонатора.

Появление в показателе степени разности $(z - L_1)$ связано с тем, что начало отсчета по оси OZ в области II находится в точке L_1 . Первое слагаемое в выражении (11) характеризует волну, распространяющуюся в положительном направлении оси OZ, второе – в отрицательном.

Подставляя полученные выражения (8), (10) и (11) в (12), получаем продольную скалярную функцию в области II резонатора в цилиндрической системе координат:

$$\psi^{\text{II}} = J_m(\kappa r) \cos(m\varphi) \left[A_5 e^{-j\beta^{\text{II}}(z-L_1)} + A_6 e^{j\beta^{\text{II}}(z-L_1)} \right], \quad (12)$$

где $A'_1 = A_1 - A_3 - A_5$, $A'_2 = A_1 - A_3 - A_6$.

Для вычисления собственных значений оператора или, что то же самое, поперечных волновых чисел, воспользуемся граничными условиями на контуре поперечного сечения, то есть при выполнении равенства $r = R$. Для колебаний типа TM (продольные электрические волны) следует:

$$J_m(\kappa_{TM}^{\Pi} R) = 0, \quad (13)$$

откуда поперечное волновое число κ_{TM} для волн типа TM определяется выражением

$$\kappa_{TM}^{\Pi} = \frac{\mu_{mn}}{R}, \quad (14)$$

где μ_{mn} – n -ый корень функции Бесселя $J_m(\kappa_{TM}^{\Pi} r)$.

Таким образом, продольное волновое число в этом случае определяется выражением:

$$\beta_{TM}^{\Pi} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\mu_{mn}}{R}\right)^2} = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - \left(\frac{\mu_{mn}}{R}\right)^2}, \quad (15)$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота возбуждающего резонатор электромагнитного поля; ε и μ – абсолютная диэлектрическая и магнитная проницаемость заполнения волновода, соответственно.

Основываясь на граничном условии, получаем из (2) для $r = R$:

$$\frac{dJ_m(\kappa_{TE}^{\Pi} r)}{dr} \Big|_{r=R} = 0, \quad (16)$$

откуда следует, что поперечное волновое число κ_{TE}^{Π} для волн типа TE будет равно:

$$\kappa_{TE}^{\Pi} = \frac{\mu'_{mn}}{R} \quad (17)$$

где μ'_{mn} – n -ый корень производной функции Бесселя первого рода.

Для этого случая продольное волновое число β_{TE}^{Π} определяется из выражения:

$$\beta_{TE}^{\Pi} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{\mu'_{mn}}{R}\right)^2} = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - \left(\frac{\mu'_{mn}}{R}\right)^2}. \quad (18)$$

Используя полученные в (14), (15), (17), (18) выражения для поперечных и продольных волновых чисел в случае TM и TE волн получаем окончательные выражения для соответствующих собственных скалярных функций в области Π резонатора:

$$\psi_{TM}^{\Pi} = J_m\left(\frac{\mu_{mn}}{R} r\right) \cos(m\varphi) \left[K_1 e^{-j\sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - \left(\frac{\mu_{mn}}{R}\right)^2} (z-L_1)} + K_2 e^{j\sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - \left(\frac{\mu_{mn}}{R}\right)^2} (z-L_1)} \right] \quad (19)$$

$$\psi_{TE}^{\Pi} = J_m\left(\frac{\mu'_{mn}}{R} r\right) \cos(m\varphi) \left[K_3 e^{-j\sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - \left(\frac{\mu'_{mn}}{R}\right)^2} (z-L_1)} + K_4 e^{j\sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - \left(\frac{\mu'_{mn}}{R}\right)^2} (z-L_1)} \right] \quad (20)$$

где K_1, K_2 – неизвестные коэффициенты, которые соответствуют коэффициентам A'_1, A'_2 из выражения (12) в случае ТМ-волн, а K_3, K_4 – в случае ТЕ-волн.

Полученные для области II резонатора решения позволяют перейти теперь к рассмотрению областей I и III, используя тот же метод разделения переменных, что и выше. Будем искать собственную скалярную функцию ψ в виде, аналогичном (12):

$$\psi^{I,II} = P(r) \cdot \Phi(\varphi) \cdot Z(z). \quad (21)$$

Исходя из плавного перехода области II резонатора в область I, а также монотонного изменения поперечного сечения области I можно считать, что в левой части резонатора решения уравнений (4) и (5) будут иметь тот же вид (8) и (10), что и в области II. Но поскольку здесь радиус поперечного сечения является функцией z , то есть

$$R_1(z) = R - (L_1 - z) \operatorname{tg} \alpha, \quad (22)$$

то и

$$\kappa_{TM}^I = \frac{\mu_{mn}}{R - (L_1 - z) \operatorname{tg} \alpha}, \quad (23)$$

$$\kappa_{TE}^I = \frac{\mu'_{mn}}{R - (L_1 - z) \operatorname{tg} \alpha}. \quad (24)$$

Это приводит к тому, что продольные волновые числа $\beta_{TM}^I(z)$ и $\beta_{TE}^I(z)$ будут также функцией продольной координаты z :

$$\beta_{TM}^I(z) = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - \left(\frac{\mu_{mn}}{R - (L_1 - z) \operatorname{tg} \alpha} \right)^2}, \quad (25)$$

$$\beta_{TE}^I(z) = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - \left(\frac{\mu'_{mn}}{R - (L_1 - z) \operatorname{tg} \alpha} \right)^2}. \quad (26)$$

Для решения уравнения (6) в области I необходимо воспользоваться методом присоединенных функций. Тогда функция $Z(z)$ в случае волны типа ТМ будет иметь вид

$$Z(z) = K_5 \sqrt[4]{\frac{t_{TM}^I(z)}{[\beta_{TM}^I(z)]^2}} v(t_{TM}^I(z)), \quad (27)$$

а для волны типа ТЕ –

$$Z(z) = K_6 \sqrt[4]{\frac{t_{TE}^I(z)}{[\beta_{TE}^I(z)]^2}} v(t_{TE}^I(z)), \quad (28)$$

где K_5, K_6 – неизвестные коэффициенты.

На основании полученных результатов скалярную функцию ψ^I для случаев ТМ и ТЕ-волн, используя выражение (21), можно представить в виде:

$$\psi_{TM}^I = K_5 J_m \left(\frac{\mu_{mn}}{R - (L_1 - z) \operatorname{tg} \alpha} r \right) \cos(m\varphi) \sqrt[4]{\frac{t_{TM}^I(z)}{[\beta_{TM}^I(z)]^2}} v(t_{TM}^I(z)), \quad (29)$$

$$\psi_{TE}^I = K_5 J_m \left(\frac{\mu'_{mn}}{R - (L_1 - z) \operatorname{tg} \alpha} r \right) \cos(m\varphi) \sqrt[4]{\frac{t_{TE}^I(z)}{[\beta_{TE}^I(z)]^2}} v(t_{TE}^I(z)), \quad (30)$$

где

$$t_{TM}^I(z) = - \left(\frac{3}{2} \int_{L_1 - L_{01}}^z \beta_{TM}^I(z) dz \right)^{\frac{2}{3}} =$$

$$= - \left[\frac{3\mu_{mn}}{2\operatorname{tg} \alpha} \left(\arccos F_{TM}^I - \arccos G_{TM}^I - \frac{\sqrt{1 - (F_{TM}^I)^2}}{F_{TM}^I} + \frac{\sqrt{1 - (G_{TM}^I)^2}}{G_{TM}^I} \right) \right]^{\frac{2}{3}}; \quad (31)$$

$$t_{TE}^I(z) = - \left(\frac{3}{2} \int_{L_1 - L_{01}}^z \beta_{TE}^I(z) dz \right)^{\frac{2}{3}} =$$

$$= - \left[\frac{3\mu_{mn}}{2\operatorname{tg} \alpha} \left(\arccos F_{TE}^I - \arccos G_{TE}^I - \frac{\sqrt{1 - (F_{TE}^I)^2}}{F_{TE}^I} + \frac{\sqrt{1 - (G_{TE}^I)^2}}{G_{TE}^I} \right) \right]^{\frac{2}{3}}; \quad (32)$$

$$F_{TM}^I = \frac{\mu_{mn}}{\omega \sqrt{\varepsilon \mu} (R - L_{01} \operatorname{tg} \alpha)};$$

$$G_{TM}^I = \frac{\mu_{mn}}{\omega \sqrt{\varepsilon \mu} (R - (L_1 - z) \operatorname{tg} \alpha)};$$

$$F_{TE}^I = \frac{\mu'_{mn}}{\omega \sqrt{\varepsilon \mu} (R - L_{01} \operatorname{tg} \alpha)};$$

$$G_{TE}^I = \frac{\mu'_{mn}}{\omega \sqrt{\varepsilon \mu} (R - (L_1 - z) \operatorname{tg} \alpha)};$$

В области III резонатора функция ψ^{III} находится из выражений, аналогичных (29), (30), но в этом случае радиус определяется соотношением:

$$R_{\text{III}}(z) = R - (z - L - L_1) \operatorname{tg} \alpha \quad (33)$$

Таким образом,

$$\psi_{TM}^{\text{III}} = K_7 J_m \left(\frac{\mu_{mn}}{R - (z - L - L_1) \operatorname{tg} \alpha} r \right) \cos(m\varphi) \sqrt[4]{\frac{t_{TM}^{\text{III}}(z)}{[\beta_{TM}^{\text{III}}(z)]^2}} v(t_{TM}^{\text{III}}(z)), \quad (34)$$

$$\psi_{TE}^{\text{III}} = K_8 J_m \left(\frac{\mu'_{mn}}{R - (z - L - L_1) \operatorname{tg} \alpha} r \right) \cos(m\varphi) \sqrt[4]{\frac{t_{TE}^{\text{III}}(z)}{[\beta_{TE}^{\text{III}}(z)]^2}} v(t_{TE}^{\text{III}}(z)), \quad (35)$$

где

$$t_{TM}^{III}(z) = - \left(\frac{3}{2} \int_{L+L_1+L_{01}}^z \beta_{TM}^{III}(z) dz \right)^{\frac{2}{3}} =$$

$$= - \left[\frac{3\mu_{mn}}{2tg\alpha} \left(\arccos F_{TM}^{III} - \arccos G_{TM}^{III} - \frac{\sqrt{1-(F_{TM}^{III})^2}}{F_{TM}^{III}} + \frac{\sqrt{1-(G_{TM}^{III})^2}}{G_{TM}^{III}} \right) \right]^{\frac{2}{3}}; \quad (36)$$

$$t_{TE}^{III}(z) = - \left(\frac{3}{2} \int_{L+L_1+L_{01}}^z \beta_{TE}^{III}(z) dz \right)^{\frac{2}{3}} =$$

$$= - \left[\frac{3\mu_{mn}}{2tg\alpha} \left(\arccos F_{TE}^{III} - \arccos G_{TE}^{III} - \frac{\sqrt{1-(F_{TE}^{III})^2}}{F_{TE}^{III}} + \frac{\sqrt{1-(G_{TE}^{III})^2}}{G_{TE}^{III}} \right) \right]^{\frac{2}{3}}; \quad (37)$$

$$F_{TM}^{III} = F_{TM}^I;$$

$$F_{TE}^{III} = F_{TE}^I;$$

$$G_{TM}^{III} = \frac{\mu_{mn}}{\omega\sqrt{\varepsilon\mu} \cdot (R - (z - L - L_1)tg\alpha)};$$

$$G_{TE}^{III} = \frac{\mu_{mn}}{\omega\sqrt{\varepsilon\mu} \cdot (R - (z - L - L_1)tg\alpha)};$$

$$\beta_{TM}^{III}(z) = \sqrt{\omega^2 \varepsilon\mu - \left(\frac{\mu_{mn}}{R - (z - L - L_1)tg\alpha} \right)^2};$$

$$\beta_{Te}^{III}(z) = \sqrt{\omega^2 \varepsilon\mu - \left(\frac{\mu_{mn}}{R - (z - L - L_1)tg\alpha} \right)^2}.$$

Полученные выражения (19), (20), (24), (25), (34), (35) описывают распределение электромагнитного поля во всех трех областях резонатора для случаев ТМ и ТЕ-волн.

Таким образом, теоретическое описание и расчет основных параметров биконического резонатора СВЧ-устройств позволяют констатировать необходимость применения биконического резонатора для непрерывной технологической обработки растительного сырья.

In article the theoretical description and calculation of key parameters the biconical resonator for continuous technological processing vegetative raw material is considered

1. Тихонов А.И., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1986. – 724 с.
2. Ильин В.А., Позняк Э.Г. Линейная алгебра. – М.: Наука, 1978. – 302 с.
3. Григорьев А.Д., Янкевич В.Б. Резонаторы и резонаторные замедляющиеся системы СВЧ: системные методы расчета и проектирования. – М.: Редко и связь. 1984. – 248 с.

ЕКОНОМІКА НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОГРЕССА

УДК 517.977

МОДЕЛІ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
ОПТИМІЗАЦІЇ ПОВЕДІНКИ ВИРОБНИКА

Пляшкевич О.М., Забитовська О.І.

Вступ. У змішаній економіці можна виділити дрібних виробників, середніх виробників, великий бізнес. Дрібні виробники, як правило, утворюють найбільш чисельний сектор в економіці. Цей сектор відіграє велику роль у підтримці конкурентних відносин в економіці і швидше інших реагує на економічну обстановку, що змінюється, пристосовуючи до неї. Ці виробники, як правило, діють в умовах досконалої конкуренції.

Середні виробники найчастіше спеціалізуються на випуску продукції, що користується постійним, але обмеженим попитом. Їм приходиться конкурувати як із дрібним, так і з великим бізнесом. Вони виступають найчастіше в ролі мінімонополій.

Великий бізнес робить масову, стандартну продукцію, розраховану на широко розповсюджені потреби. Він виступає в ролі великих монополій, тому що саме монополія має у своєму розпорядженні найкращі можливості для випуску масової продукції.

Мети статті. Постановка задачі. У змішаній економіці різні виробники можуть функціонувати при різних ринкових структурах. Існують різні типи структур, обумовлені різним ступенем зрілості ринкових відносин: зроблена конкуренція, монополія, моносонія, олігополія й олігосонія. Ці типи ринків розрізняються між собою в першу чергу кількістю учасників, що виступають як у ролі продавців, так і в ролі споживачів.

Досконала конкуренція. Виробник діє на ринку товарів і послуг і на ринку факторів виробництва в умовах досконалої конкуренції, якщо: ціни кожного фактора виробництва заздалегідь задані; ціна виробленої продукції фіксована; ціни на фактори виробництва і вироблену продукцію не залежать від прийнятих виробником рішень; виробник може придбати будь-яку необхідну кількість факторів виробництва; виробник може збути усю свою вироблену продукцію. Це означає, що виробник споживає незначну кількість факторів виробництва і робить відносно мало продукції в порівнянні з загальними обсягами факторів виробництва і продукції ринків, так що його дії не позначаються на цінах ринків.

У структурі недосконалої конкуренції розглянемо наступні ринкові структури.

Монополія, у якій виробник має монополію на ринку благ (товарів і послуг) при реалізації свого продукту, коли: тільки він один постачає ринок цим продуктом; попит на цей продукт формується великим числом споживачів, що діють незалежно друг від друга. У цих умовах виробник має справу з попитом, величина якого змінюється в залежності від ціни на продукцію, але характер цієї зміни не залежить прямо від його рішень, тобто ціна на продукцію залежить тільки від кількості продукції, що виробник запропонує для продажу на ринок. Таким чином, монополіст може вплинути на ціну продукції, варіюючи обсяг випуску своєї продукції.

Моносонія, де виробник функціонує на ринку ресурсів в умовах моносонії, коли: виробник є єдиним покупцем факторів виробництва на ринку ресурсів; ціни на фактори виробництва можуть варіювати в залежності від обсягу їхнього попиту. У цьому випадку, будучи єдиним покупцем деякого ресурсу, виробник може вплинути на його ціну шляхом чи збільшення зменшення попиту на нього, тобто виробник може придбати більшу кількість даного ресурсу, запропонувавши велику плату (ціну) за нього.

Олігополія. Виробник діє в умовах олігополії якщо: на ринку товарів і послуг діє невелике число виробників того самого продукту; кожний з виробників має значний внесок у місткість ринку, так що кожний з них має можливість робити дію на ціну продукції. У даному випадку, приймаючи власне рішення про випуск продукції, виробник повинний

враховувати і рішення, прийняті іншими виробниками, що діють на ринку товарів і послуг.

Олігопсонія. Виробник діє в умовах олігопсонії, коли: на ринку ресурсів діє невелике число виробників, що здобувають ті самі фактори виробництва; кожний з виробників здобуває порівняно великий обсяг ресурсів, так що кожний з них може впливати на ціну ресурсів, що здобуваються. У такій ситуації виробник також не може мати повного впливу на ринку ресурсів, тому що величина цін і обсягів ресурсів, що здобуваються, залежить від дій кожного з виробників, що здобувають ресурси на цьому ринку.

Основна мета виробника полягає в максимізації прибутку шляхом вибору набору x витрат ресурсів при заданих виробничій функції $y=f(x)$, ціні p продукції, що випускається, і векторі цін $q=(q_1, q_2, \dots, q_n)$ ресурсів, тобто передбачається, що виробник діє в умовах досконалої конкуренції. Прибуток Π дорівнює доходу за винятком витрат виробництва, тобто

$$\Pi = py - (q_1x_1 + q_2x_2 + \dots + q_nx_n) = py - \sum_{j=1}^n q_jx_j$$

Основні результати дослідження. Будемо розрізняти довгострокову задачу виробника і короткострокову. У довгостроковій перспективі виробник може вибрати любий вектор витрат із простору витрат E_+^n . Тому задача формулюється так:

знайти

$$\max \Pi = py - \sum_{j=1}^n q_jx_j.$$

при умовах

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ x_j \geq 0, \quad j = \overline{1, n}.$$

У короткостроковій задачі з'являються обмеження на вибір витрат через облік, наприклад, різних лімітів постачань ресурсів по договірних зобов'язаннях. У цій задачі виробник повинний вибрати такий вектор витрат $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, що максимізує прибуток

$$\Pi = py - \sum_{j=1}^n q_jx_j.$$

де $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$,

при додаткових умовах

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_i, \quad i = \overline{1, m}, \\ x_j \geq 0, \quad j = \overline{1, n}.$$

Довгострокові і короткострокові задачі виробника відносяться до задач математичного програмування. Обмежимося тут дослідженням тільки довгострокової задачі виробника. Необхідними умовами для максимізації прибутку (умови Куна - Таккера) є, причому $j = \overline{1, n}, x_j \geq 0$:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_j} = p \frac{\partial y}{\partial x_j} - q_j \leq 0, \quad \frac{\partial \Pi}{\partial x_j} x_j = \left(p \frac{\partial y}{\partial x_j} - q_j \right) x_j = 0.$$

З цих умов випливає, що якщо $x_j > 0$, тоді $p \frac{\partial y}{\partial x_j} - q_j = 0$ чи тоді $p \frac{\partial y}{\partial x_j} = q_j$. Якщо ж

$p \frac{\partial y}{\partial x_j} - q_j < 0$, то $x_j = 0$.

Помітимо, що $p \frac{\partial y}{\partial x_j}$ являє собою вартість граничного продукту в крапці оптимуму

для j -го ресурсу. Звідси можна зробити висновок: якщо ресурс використовується для досягнення максимуму прибутку, те вартість граничного продукту для ресурсу j дорівнює вартості одиниці використовуваного ресурсу. Якщо ж вартість граничного продукту для ресурсу j менше вартості одиниці використовуваного ресурсу, то цей ресурс недоцільно використовувати у виробництві. Припустимо, що в крапці оптимуму всі ресурси використо-

вуються, тобто $x^* > 0$. Якщо $j = \overline{1, n}$, тоді в крапці оптимуму маємо: $q_j / \frac{\partial y}{\partial x_j}$, що означає: ціна продукту збігається з витратами на одиницю граничного продукту. Таким чином, для всіх ресурсів, затрачуваних у виробництві, ми одержуємо умови максимуму прибутку при $j = \overline{1, n}$:

$$p \frac{\partial f}{\partial x_j} = q_j,$$

що означають, що у випадку, коли виробник працює оптимально (з максимальним прибутком), вартість додаткового продукту на додаткову одиницю використовуваного ресурсу j -го виду дорівнює ціні цього ресурсу. Якби ця умова не була виконана, то або $p \frac{\partial f}{\partial x_j} > q_j$

або $p \frac{\partial f}{\partial x_j} < q_j$. У першому випадку має сенс збільшити використання j -го ресурсу поки не буде виконана умова $p \frac{\partial f}{\partial x_j} = q_j$, тому що одиниця його додаткового використання дає виробнику додатковий прибуток

$$\Pi_j = \frac{\partial f}{\partial x_j} - q_j$$

В другому випадку збільшення j -го ресурсу приводить до збитку, тому що $p \frac{\partial f}{\partial x_j} - q_j < 0$, тому прагнення збільшити прибуток приводить до зменшення збитку, тобто зменшенню використання j -го ресурсу, поки не буде виконана умова $p \frac{\partial f}{\partial x_j} = q_j$, або поки j -й ресурс не буде виключений з виробництва ($x_j = 0$). Таким чином, при фіксованих цінах ми маємо n рівнянь, причому $j = \overline{1, n}$:

$$p \frac{\partial f}{\partial x_j} = q_j,$$

з яких можна визначити значення кількостей $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ ресурсів, при яких прибуток виробника максимальний.

Наприклад, нехай $y = x_1^{1/2} x_2^{1/3}$ - виробнича функція. Тоді прибуток визначається по формулі

$$\Pi = py - q_1 x_1 - q_2 x_2 = p x_1^{1/2} x_2^{1/3} - q_1 x_1 - q_2 x_2$$

а умовами максимізації прибутку є рівності

$$\frac{\partial \Pi}{\partial x_1} = \frac{1}{2} p x_1^{-1/2} x_2^{1/3} - q_1 = 0 \quad \text{і} \quad \frac{\partial \Pi}{\partial x_2} = \frac{1}{3} p x_1^{1/2} x_2^{-2/3} - q_2 = 0.$$

З них знаходимо

$$x_1^* = \frac{p^6}{216 q_1^3 q_2^3} \quad \text{і} \quad x_2^* = \frac{p^6}{144 q_1^4 q_2^2}$$

Підставляючи знайдені значення x_1^* й x_2^* у виробничу функцію, знаходимо оптимальний випуск продукції

$$y^* = \frac{p^5}{72 p_1^3 p_2^2}$$

і максимальне значення прибутку

$$\Pi = p y^* - q_1 x_1^* - q_2 x_2^* = \frac{p^6}{216 q_1^3 q_2^2}$$

Витрати є функцією $C(y)$ від випуску y , і якщо функція $C(y)$ явно задана, то задача максимізації прибутку зводиться до перебування максимуму функції однієї перемінної y .

$$\Pi(y) = py - C(y)$$

Необхідною умовою оптимальності є

$$\frac{d\Pi}{dy} = p - \frac{dC}{dy} = 0,$$

тобто $\frac{dC}{dy} = p$, що означає рівність граничних витрат і ціни продукції, що випускається.

Достатньою умовою максимуму є позитивність другої похідної $\frac{d^2C}{dy^2}$. Це означає, що гра-

ничні витрати повинні зростати. Оптимальний рівень випуску при ціні p і заданих цінах на ресурси знаходиться з умови $\frac{dC}{dy} = p$.

Так, наприклад, для функції $y = x_1x_2$ маємо $C(y) = 2\sqrt{q_1q_2y}$. Тоді оптимальний випуск визначається з умови $\frac{dC}{dy} = p$, тобто $\frac{\sqrt{q_1q_2}}{\sqrt{y^*}} = p$. Отже, $y^* = \frac{q_1q_2}{p^2}$.

Висновок: Розглянуті нами моделі, у різних ринкових структурах, дозволяють сформулювати керівнику підприємства комплекс правил для поведінки в умовах досконалої і недосконалої конкуренції з метою максимізації прибутку й обсягів продукції, що випускається.

The types of various market structures are analysed. The purposes of management of the manufacturer are considered. The models of the profit in various market structures are constructed. The recommendations of behaviour of the chief of the enterprise are produced.

1. Береза А.М. Основы образования информационных систем. – К.: КНЕУ, 1998. – 140с.
2. Под ред. проф. Чемоданова Б.К. Математические основы теории автоматического регулирования. - М.: Высшая школа, 1977. – Т.1 –518с.
3. Петренко В.Л., Тимохин В.Н. Исследование динамики адаптивных экономических моделей. Модели управления в рыночной экономике.// Сб. научн. трудов. – Донецк: ДонГУ, 1998. – 271с.

МОДЕЛІ І МЕТОДИ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА

Пляшкевич О.М.

Введення. Кожен виробник, приймаючи рішення про витрати і випуск продукції, переслідує ту чи іншу мету. У сучасній економічній теорії затвердився підхід, відповідно до якого виробник прагне приймати такі рішення, що забезпечували б йому одержання максимального прибутку. Однак у виробника можуть бути й інші мети: максимізація обсягу продажів, доходу в розрахунку на одного працівника, мінімізація витрат та ін.

Мета статті. Постановка задачі. Виробництво благ здійснюється за допомогою використання визначених факторів виробництва, відповідно до заданої технології. Нас цікавлять не фізичні характеристики цієї технології, а ті кількісні залежності, що існують між витратами ресурсів і випусками продукції й обумовлені цією технологією. Випускаються виробником блага надалі будемо, як це прийнято в економіці, називати продукцією. Виробник може споживати (використовувати для виробництва) кілька факторів (ресурсів) і випускати кілька видів продукції. Позначимо через $x_j (j=1, n)$ кількість j -го фактора виробництва, використовуваного виробником. Тоді обсяги витрат усіх факторів виробництва, використовуваних виробником, можна представити як вектор $x=(x_1, x_2, \dots, x_n)$, який має назву вектор витрат факторів чи виробництва виробничих ресурсів. Під простором витрат E_+^n будемо розуміти безліч усіляких векторів витрат виробника, що є ненегативним ортантом n -ірного векторного простору E^n , тобто

$$E_+^n = \{x=(x_1, x_2, \dots, x_n): x_j \geq 0, j=1, n\}.$$

Так як $n=2$, то E_+^n представляє безліч векторів першої чверті площини $x_1 O x_2$.

Простір витрат може являти собою і деяку замкнуту чи відкриту безліч витрат $G \in E_+^n$. Тут x_1^{\min} і x_2^{\min} - мінімальні обсяги ресурсів, необхідних для підтримки процесу виробництва в робочому стані, x_1^{\max} і x_2^{\max} - максимальні обсяги ресурсів, що мають на ринку ресурсів.

Варто помітити, що, як і у випадку споживача, при моделюванні поведінки виробника простір витрат може бути представлене у вигляді безупинної безлічі, дискретної чи безлічі дискретно-безупинної безлічі. Але ми надалі будемо розглядати тільки безупинний простір факторів виробництва, тобто будемо припускати, що усі фактори виробництва є діленими. Кожному вектору x витрат факторів виробництва відповідають визначені обсяги випуску продукції при даній технології. Позначимо через $y_i (i=1, m)$ обсяг випуску i -го виду продукції, тоді вектор $y=(y_1, y_2, \dots, y_m)$ являє собою обсяги випуску продукції усіх видів, вироблених виробником при використанні витрат факторів виробництва, заданих вектором x . Вектор y назвемо вектором випуску продукції. Таким чином, вектор витрат x визначає вектор y випуску продукції. Пари векторів (x, y) називають технологічним процесом. Сукупність усіляких технологічних процесів (x, y) називають технологічною безліччю виробника, чи безліччю виробничих можливостей. У структурі технологічної безлічі відбиваються особливості технології, так що вивчення технології виробника зводиться до вивчення його технологічної безлічі. Виробника, мабуть, повинні цікавити найбільш ощадливі перетворення виробничих ресурсів у продукти. Технологічний процес (x^*, y^*) називається ефективним чи оптимальної по Парето, якщо не існує іншого процесу виробника, більш ефективного, чим (x^*, y^*) . Природно, що виробника повинні цікавити тільки ефективні технологічні процеси. Таким чином, існує визначена залежність між використовуваними обсягами факторів виробництва і максимальним рівнем виробництва, якого вони дозволяють досягти.

Розглянемо найбільш простий випадок. Нехай виробник випускає тільки один вид

продукції, що забезпечується одним єдиним фактором виробництва, наприклад працею. Тоді використання праці в обсязі x^* дозволяє випустити максимальний обсяг продукції y^* чи будь-який інший обсяг продукції z , менший, чим y^* . Тоді процес (x^*, y^*) буде ефективним, а всі інші процеси (x^*, z) , де $0 \leq z < y^*$, будуть неефективними.

Пари векторів (x, y) , що задає технологічний процес, можна розглядати як вектор простору E^{n+m} , що називається вектором витрат - випуску виробника. Тоді технологічна безліч є безліч усіляких векторів витрат-випусків у просторі E^{n+m} . Звичайно приймається додаткова гіпотеза про те, що технологічна безліч опукла. Розглянемо такі технологічні процеси, у кожному з яких виготовляється тільки один продукт. Такі процеси назвемо однопроводковими. Нехай при виготовленні однієї одиниці продукції ресурс j -го виду використовується в кількості a_j . Тоді вектор витрат на одиницю продукції $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T$.

Якщо випуск продукції складає u одиниць, то тоді вектор витрат ресурсів $x = ua$.

Нехай тепер той самий продукт виробляється декількома (r) технологічними процесами, причому кожен процес при визначеному сполученні ресурсів забезпечує випуск однієї одиниці продукції. Ці процеси задаються векторами витрат

$$a_1 = \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{21} \\ \vdots \\ a_{n1} \end{pmatrix}, a_2 = \begin{pmatrix} a_{12} \\ a_{22} \\ \vdots \\ a_{n2} \end{pmatrix}, \dots, a_r = \begin{pmatrix} a_{1r} \\ a_{2r} \\ \vdots \\ a_{nr} \end{pmatrix},$$

простору E_+^n . Якщо y_1, y_2, \dots, y_r - кількість продукції, що випускається відповідно 1, 2, ..., r процесами, тоді загальний випуск продукції $y = y_1 + y_2 + \dots + y_r$, а вектор витрат ресурсів $x = a_1 y_1 + a_2 y_2 + \dots + a_n y_n$. Тоді пари

$$(x, y) = \begin{pmatrix} a_1 y_1 \\ y_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_2 y_2 \\ y_2 \end{pmatrix} + \dots + \begin{pmatrix} a_r y_r \\ y_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 y_1 + a_2 y_2 + \dots + a_r y_r \\ y_1 + y_2 + \dots + y_r \end{pmatrix}$$

при $y_1 \geq 0, y_2 \geq 0, \dots, y_r \geq 0$ задають технологічну безліч.

Якщо кожен вид затрачуваних ресурсів обмежений ($x_j \leq b_j; j = \overline{1, n}$), тоді можна сформулювати наступну задачу максимізувати загальний випуск продукту при обмежених ресурсах, тобто

$$\max y = y_1 + y_2 + \dots + y_r$$

за умови

$$\begin{aligned} a_{11}y_1 + a_{12}y_2 + \dots + a_{1r}y_r &\leq b_1, \\ a_{21}y_1 + a_{22}y_2 + \dots + a_{2r}y_r &\leq b_2 \\ \dots\dots\dots &\dots\dots\dots \\ a_{n1}y_1 + a_{n2}y_2 + \dots + a_{nr}y_r &\leq b_n \end{aligned}$$

де $y_1 \geq 0, y_2 \geq 0, \dots, y_r \geq 0$.

Рішення цієї задачі і виявить ті процеси, які варто використовувати у виробництві даного виду продукції в цій ситуації, тобто це ті процеси, вектори витрат яких ввійдуть в оптимальний базис.

Виробник, як було сказано, намагається домогтися, щоб використовувані процеси були ефективними, і, таким чином, інтерес представляє не вся технологічна безліч, а його границя. Отже, досить розглядати лише функцію, що задає границю технологічної безлічі. Така функція і називається виробничою. Аналогом її, у теорії автоматичного керування, є передаточні функції. Історично уточнення понять, що відносяться до виробничих функцій, відбувалося на економічній основі, що, можливо, порозумівається наступними причинами. По-перше, виробничі функції самі по собі мають значення для розробки програм економічного розвитку і для визначення межі збільшення зробленого продукту при даних вихідних ресурсах. По-друге, розміри коефіцієнтів виробничих витрат служать базою при визначенні оптимальної структури міжнародної чи міжрегіональної торгівлі. По-третє, це

поняття лежить в основі деяких теорій функціонального розподілу доходу. Умови, при яких загальний випуск продукції може бути віднесений за рахунок дії факторів, що брали участь у його створенні, залежать від характеру виробничої функції. По-четверте, виробнича функція забезпечує половину інформації загального характеру, необхідної при визначенні ступеня використання ресурсів і структури випуску, при наявності яких досягається максимум прибутків.

У загальному виді цю функцію можна записати як рівняння з однієї перемінної, що характеризують витрати, можуть використовуватися для виявлення деяких властивостей виробничих функцій і відповідних додаткових продуктів. Ті ж самі властивості звичайно мають місце і при n перемінних. Однак у цьому випадку випуск при використанні тільки одного фактора ніколи не перевищує нуля.

Відповідно виробничу функцію варто представити як

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (1)$$

де Y - випуск,
 X_i - витрати ресурсу.

Загалом, при наявності виробничої функції можна визначити наступні величини, що мають безпосереднє значення для економіки:

$$\frac{\delta Y}{\delta X_i} = f'_{xi}(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (2)$$

$$\frac{\delta X_i}{\delta X_j} = -\frac{f'_{xj}(X_1, X_2, \dots, X_n)}{f'_{xi}(X_1, X_2, \dots, X_n)} \quad (3)$$

$$X_i = f''(Y, X_1, \dots, X_n) \quad (4)$$

$$\frac{\delta X_i}{\delta X_j} = -k \quad (5)$$

$$\frac{\delta X_i}{\delta X_j} = 0 \quad (6)$$

Приведені вираження, що базуються на виробничій функції, дозволяють одержати дані, необхідні для економічного аналізу. Бажано одержати зазначені характеристики для різних видів функцій. Розглянемо їх один по одному: рівняння (2) являє собою рівняння додаткового продукту в натуральному вираженні для i -го ресурсу; рівняння (3) - рівняння граничних норм заміняємості i -го і j -го ресурсів; (4) - рівняння ізоквант; (5) - рівняння ізокліналей; (6) - рівняння розмежувальних ліній. Якщо вираження, представлене рівнянням (3), підставити в рівняння (5) і (6), то стане очевидним, що кожна з розглянутих величин, установлювана для одного ресурсу, залежить від усього набору ресурсів, що можуть бути використані в даному виробничому процесі.

Звичайно, можна прийняти, що визначені види витрат залишаються постійними в той час, як інші змінюються. Однак визначені чи ресурси категорії витрат є екзогенними в тім змісті, що «вони є результатом дії зовнішніх сил» і не піддаються контролю з боку обличчя, що приймає рішення, чи з боку дослідника. Тому, коли можна контролювати величину лише ресурсів X_1, X_2, \dots, X_g , тоді випадковий чи вплив збурювання асоціюється з перемінними $X_{g+1}, X_{g+2}, \dots, X_n$

Функція Кобба-Дугласа. чи статична функція, звичайно застосовується у виді

$$Y = aX^b, \quad (7)$$

де X - перемінний ресурс, представлений у якому-небудь вимірі,
 Y - випуск продукції,
 a - постійна
 b - коефіцієнт трансформації величини X .

Функція допускає постійний, зростаючий або додатковий продукт, що знижується. Вона не допускає, щоб крива витрат - випуску охоплювала всі три випадки одночасно.

Очікується, що при постійному рівні усіх витрат, крім тих, котрі враховуються функцією, додатковий продукт повинний падати. Рівняння додаткового продукту має вид

$$\frac{dY}{dX} = baX^{b-1} = \frac{baX^b}{X} \quad (8)$$

Воно показує, що якщо $b = 1$, тоді додатковий продукт, а також середній продукт, будуть постійно рівні a . Коли $b > 1$, величина додаткових продуктів буде виростати в міру збільшення X в залежності від величини b . Наприклад, якщо $b=2$, додаткові продукти складають ba , $2ba$, $3ba$ і $4ba$, причому значення X відповідно рівні 1, 2, 3, 4. Якщо $b < 1$, то величина додаткових продуктів буде падати в міру збільшення X , оскільки $X^b < X$.

Цю функцію з визначеними математичними властивостями не можна задовільно використовувати там, де дані охоплюють як збільшувемий, так і падаючий додатковий продукт. Цю функцію не можна задовільно використовувати й у тому випадку, коли дані допускають одержання як позитивних, так і негативних додаткових продуктів. Ступінь зниження випуску додаткового продукту скорочується з збільшенням величини витрат.

Висновки. Дослідники протягом тривалого часу вели дослідження, одержуючи нові зведення про властивості виробничих функцій. Звичайне проведення досліджень планувалося на основі явища дискретності, тобто застосовувалися два чи кілька технологічних способів виробництва для визначення крапкових оцінок виходу продукції. У деяких випадках, хоча це і був побічний результат, отриманих даних було досить для висновку простих рівнянь чи регресії кривих, що показують залежність випуску від витрат (залежність вхід-вихід). Виходячи з цих розходжень може бути розрахована відносна прибутковість декількох технологічних чи способів видів витрат. Однак у загальному було неможливо застосувати точні економічні принципи для визначення найбільш прибуткового рівня витрат і чи випуску для визначення найбільш вигідної комбінації витрат для одержання обумовленої кількості продукції.

The purposes of the manufacturer are formulated at acceptance of the administrative decisions. The technique of the decision of a task is offered which provides of volume of sales, income in account on one worker, minimization of costs etc. the Decision of a task is carried out with the help of use of the certain factors of manufacture, according to the given technology.

1. Кочура Е.В. Экономическая кибернетика. - Днепропетровск: ДУЭП, 2002. – 187с.
2. Марсанов В.В. Элементы теории управленческих решений. – Херсон: Колос, 2002. – 72с.
3. Марсанов В.В., Пляшкевич О.М. Основы теории проектирования и оптимизации макроэкономических систем. – Херсон: Айлант. – 2003. – 140с.

РЕФЕРАТЫ

Бідюк П.І., Литвиненко В.І., Кроптя А.В. Аналіз ефективності функціонування мережі Байєса

Розглянуто ефективність функціонування мережі Байєса з точки зору розповсюдження невизначеностей між вузлами мережі. Наведено критерій для кількісного аналізу об'єму інформації, що передається між елементами мережі. Дані рекомендації для побудови структури МБ.

Исаев Е.А., Наговский Д.А. Математическое описание влияния кривизны контактирующих тел на угол смачивания жидкости в межчастичном пространстве

В статье исследуется влияние кривизны тел на краевой угол смачивания Θ . Рассматривается система твердое тело-жидкость-газ. Рассматриваются варианты сцепления как подобных частиц, так и частицы с плоскостью. Получена математическая модель, связывающая равновесный краевой угол смачивания с геометрией контактирующих сферических частиц и наличием жидкостной прослойки между ними, а также произведен анализ модели на предмет соответствия ее физическим представлениям о капиллярном взаимодействии различных по характеру кривизны поверхностей

Ковриго Ю.М., Фоменко Б.В., Полищук И.А. Математическое моделирование систем автоматического регулирования с учетом ограничений на управление в пакете Matlab

В статье выполнен обзор существующих методик для учета ограничений в виде неравенств на управляющее воздействие. Основное внимание уделяется использованию алгоритмов с компенсацией интегрального насыщения и проводится их сравнение.

Ложечников В.Ф., Михайленко В.С., Максименко И.Н. Аналитическая много режимная математическая модель динамики газовоздушного тракта барабанного котла средней мощности

Разработана много режимная математическая модель динамики газовоздушного тракта барабанного котла средней мощности. Полученная модель позволяет синтезировать современную многомерную оптимальную систему управления технологическим участком и исследовать ее работу в сравнении со штатной АСР.

Передерий В.И., Еременко А.П. Математические модели и алгоритмы определения релевантности принимаемых решений с учетом психофункциональных характеристик пользователей при управлении автоматизированными динамическими системами

Разработаны математические модели и алгоритмы формализации взаимосвязи внешних факторов и психофункциональных характеристик на основе теории нечетких множеств для определения релевантности принимаемых решений пользователями. Созданы программные средства автоматизации расчета оптимальных решений при управлении автоматизированными динамическими системами.

Хомченко А.Н. Новые решения обобщенной задачи Бюффона

Анализируются три различных решения обобщенной задачи Бюффона.

Бакшанська Т.Д., Рижиков Ю.Г., Тодорцев Ю.К. Математична модель процесу горіння природного газу з рециркуляцією продуктів згорання для цілей управління

У статті досліджено процес горіння природного газу з рециркуляцією продуктів згорання на основі рішень системи рівнянь хімічної термодинаміки, що дозволяє визначити достатньо детальний склад димових газів. Результати дозволяють формалізувати задачу управління процесом горіння на основі узагальненого еколого-економічного критерію оптимізації.

Шеховцов А.В., Везумский А.К., Серeda Е.С. Алгоритм сжатия информации без потерь: модифицированный алгоритм LZ77

В представленной работе предлагается ввести дополнительные условия избыточности. Одно из дополнительных условий заключается в том, что: избыточность цепочек событий может быть представлена альтернативным способом – как избыточность распределения событий после наступления некоторого количества непосредственно предшествующих событий. Практические реализации, основанные на таком подходе, обеспечивают заметно более высокую степень сжатия, чем просто устраняющие цепочечную избыточность. На основе существующего алгоритма сжатия текстовой информации без потерь разработан новый алгоритм, который показал более высокие степени сжатия в отличие от других рассмотренных алгоритмов.

Гасанов А.С. Информационные технологии построения систем прогнозирования отказов

Рассматриваются информационные технологии построения систем прогнозирования отказов в динамических системах. Для построения таких систем предложен подход на основе модели динамики в пространстве состояний (оптимального фильтра Калмана) и соотношения правдоподобия. Приведен пример применения метода к определению повреждений электрических двигателей и робототехнической системы.

Грицик В.В. Застосування штучних нейронних мереж при проектуванні комп'ютерного зору.

В статті представлено результати експериментів застосування нейронних мереж при вирішенні задачі попереднього перетворення вхідного образу, який не містить завад, а також вплив попередньої обробки зображень, що містить цифрову інформацію для її подальшої класифікації

Кириллов О.Л., Якимчук Г.С., Якимчук С.Г. Изучение электрического поля с помощью датчика измерителя электростатического потенциала на модели замкнутого металлического объема

Данная работа – представляет собою анализ состояния теоретических и практических разработок по обеспечению оптимальности управления технологическим процессом заполнения замкнутых объемов слабопроводящими заряжающимися жидкостями (СПЗЖ) при условии безопасности процесса заполнения. В работе рассмотрена взаимосвязь балансов электростатического поля (ЭСП) при накопления зарядов на поверхности Q_{Π} и внутри $Q_{Ж}$ СПЗЖ и гидродинамический процесс заполнения замкнутого объема. При построении системы оптимального управления заполнением СПЗЖ в замкнутый объем, в качестве наблюдаемого параметра исследуется потенциал поверхности заполняемой жидкости.

Ролик А.И. Модель управления перераспределением ресурсов информационно-телекоммуникационной системы при изменении значимости бизнес-процессов

Предложена модель управления распределением ограниченных ресурсов корпоративной информационно-телекоммуникационной системы, учитывающая то, что могут появляться новые задачи, поддерживающие бизнес-процессы, а значимость самих бизнес-процессов может изменяться.

Слань Ю. М., Трегуб В. Г. Оперативна нейромережна ідентифікація складних об'єктів керування

Стаття описує результати побудови оперативного нейромережного ідентифікатора на основі рекурентного градієнтного методу настроювання параметрів штучної нейронної мережі. Цей алгоритм є найшвидшим та найпростішим серед методів даного класу і вимагає найменших затрат оперативної пам'яті.

Фефелов А. А. Использование байесовских сетей для решения задачи поиска места и типа отказа сложной технической системы

В работе описан подход к решению одной из задач технической диагностики, основанный на использовании математического аппарата байесовских сетей. Этот подход включает в себя разработку структуры диагностирующей байесовской сети и метода построения оптимальной последовательности процедур тестирования компонентов сложной технической системы. Для подтверждения эффективности метода проведены тестовые эксперименты.

Хобин В.А., Титлова О.А. К вопросу измерения парожидкостного фронта в дефлегматоре абсорбционно-диффузионной холодильной машины (АДХМ)

Рассматривается вопрос о возможности повышения энергетической эффективности работы абсорбционно-диффузионных холодильных машин за счет оптимального распределения рабочего тела по элементам конструкции. Как показывает практика, распределение рабочего тела можно контролировать по температуре стенки подъемного участка дефлегматора. Однако при осуществлении такого контроля необходимо учитывать аксиальные потоки тепла, которые могут исказить результаты измерений и, как следствие, приводить к формированию неадекватного управляющего воздействия.

Шиманські З. Апаратні засоби сегментації мовного сигналу

Проаналізовано методи і алгоритми сегментації мовного сигналу, вибрано принципи побудови, розроблено структуру апаратних засобів для сегментації мовного сигналу у реальному часі та запропоновано аналітичний вираз для оцінки ефективності використання обладнання.

Бардачев Ю.Н., Дидык А.А. Использование положений теории опасности в искусственных иммунных системах

За прошлое десятилетие среди иммунологов стала популярной новая идея, бросившая вызов классическому подходу «свой-чужой», так называемая теория опасности. В статье в качестве примера рассмотрены возможности применения нового подхода для разработки искусственных иммунных систем, используемых в области информационной безопасности и переработки данных. Кратко приведены основные положения теории опасности.

Литвиненко В.И., Четырин С.П. Компенсация ошибок оператора в контуре управления следящей системы на основе синтезируемых вейвелет-сетей

Разработаны и исследованы модели нейронных вейвелет сетей для решения задачи компенсации ошибок оператора-наводчика в контуре управления следящей за целью системы. Проведены сравнительные исследования точности и адекватности полученных моделей.

Ладієва Л.Р., Зав'ялова Т.П. Оптимізація плівкового апарату роторного типу за максимальною продуктивністю

В даній статті розглядаються області використання плівкових апаратів роторного типу та проблеми, обумовлені значною частиною енерговитрат, що виникають при їх застосуванні. Для вирішення вищезазначених проблем ставиться задача оптимізації технологічних і конструктивних параметрів роботи апарату. Як можливе рішення, пропонується вибрати критерієм оптимальності апарату продуктивність при заданій концентрації продукту на виході. Керуючим впливом вибрано число обертів ротора та витрату охолоджувальної води на вході в барометричний конденсатор. Обговорюються фактори, впливаючі на тепловіддачу в апараті. Для визначення оптимальних параметрів застосовуються методи оптимізації на базі генетичного алгоритму. Далі приводяться результати пошуку технологічного режиму, при якому досягається максимальна продуктивність. Даються рекомендації щодо вибору оптимального режиму при різних конструктивних рішеннях плівкових апаратів роторного типу.

Корнієнко Б.Я., Снігур О.В. Оптимізація параметрів процесу зневоднення і гранулоутворення в апараті псевдозрідженого шару

Для процесу псевдозрідження і гранулоутворення в апараті псевдозрідженого шару був проведений пошук зони оптимальних значень змінних технологічного процесу, що впливають на коефіцієнт гранулоутворення, побудована математична модель процесу, що враховує всі фактори, які впливають на якісний і кількісний показник процесу псевдозрідження. Перевірена адекватність математичної моделі процесу. За результатами розрахунків отримано зони оптимальних значень параметрів хіміко-технологічного процесу.

Вишнеvский Л.В., Веретенник А.М., Войтецкий И.Е. Выбор критерия для оценки процесса включения генераторов на параллельную работу

Рассмотрены интегральные критерии качества переходных процессов включения генераторов на параллельную работу. Сопоставлены интегральные отклонения частот, моментов и углов нагрузки при разных фазовых углах включаемых генераторов. Предлагаемый критерий позволяет сравнивать между собой процессы включения на параллельную работу, проводить оптимизацию конструктивных параметров и способов управления синхронизацией генераторов.

Клименко А.К. Об ускорении сходимости процессов в адаптивной системе с обратной моделью

Рассматривается способ повышения скорости сходимости процессов адаптивной корректировки управляющих программ в системе, адаптивный контур которой содержит дискретный интегратор, обратную модель автоматизированного объекта и блок статистического анализа ошибок управления. Для ускорения процесса адаптации предлагается при формировании входных сигналов дискретного интегратора использовать усредненное значение ошибок каждых двух циклов воспроизведения программы.

Ковриго Ю.М., Мовчан А.П., Полицук И.А., Фоменко Б.В. Адаптивное управление теплоэнергетическими процессами

Предложены алгоритмы адаптивного управления квазистационарными энергетическими объектами, заключающийся в подстройке параметров ПИ, ПИД законов регулирования. Приведены результаты моделирования в среде MATLAB. Показана работоспособность алгоритмов в широких пределах изменения параметров объекта.

Михайленко В.С., Никольский В.В. Использование нечеткой адаптивной системы управления для компьютерного мониторинга сетью котельных установок

Статья посвящена применению адаптивных нечетких систем управления для компьютерного мониторинга котлов. Результатом исследования есть - разработка нечетких алгоритмов, которые обеспечивают эффективное регулирование в состояниях неопределенности

Шеховцов А.В., Крючковский В.В., Мельник А. Н. Решение многокритериальной оптимизации с использованием адаптивных алгоритмов

Предложен к рассмотрению новый гибридный алгоритм, для решения многокритериальных задач безусловной оптимизации, отличающийся от известных алгоритмов организацией взаимодействия локального и эволюционного поиска и позволяющий строить представительную аппроксимацию множества и фронта Парето.

Черевко О.И., Ефремов Ю.И., Одарченко А.М., Одарченко Д.М., Агафонова Ю.Ю. Теоретическое обоснование перспективного биконического резонатора для свч-устройств при переработке растительного сырья

Статья посвящена вопросам теоретического описания и расчета основных параметров биконического резонатора СВЧ-устройств. Результаты исследования позволяют констатировать необходимость применения биконического резонатора для непрерывной технологической обработки растительного сырья.

Пляшкевич О.М., Забитовська О.І. Моделі інформаційних технологій оптимізації поведінки виробника

Проаналізовано типи різних ринкових структур. Розглянуто мети керування виробника. Побудовано моделі максимізації прибутку в різних ринкових структурах. Сформовані рекомендації поведінки керівника підприємства.

Пляшкевич О.М. Моделі і методи інформаційних технологій виробництва

Сформульовані цілі виробника при прийнятті управлінських рішень. Пропонується методика вирішення задачі, що забезпечує максимізацію обсягу продажів, доходу в розрахунку на одного працівника, мінімізацію витрат та ін. Вирішення задачі здійснюється за допомогою використання визначених факторів виробництва, відповідно до заданої технології.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Агафонова Ю.Ю. - старший преподаватель, Харьковский государственный университет питания и торговли.

Бакшанская Т.Д. - аспирант кафедры. «Автоматизации теплоэнергетических процессов» Одесского национального политехнического университета.

Бардачев Ю.Н. - доктор технических наук, профессор, ректор Херсонского национального технического университета.

Бидюк П.И. - доктор технических наук, профессор Института прикладного системного анализа НТУУ “КПИ”.

Везумский А.К. - старший преподаватель кафедры «Информационных технологий» Херсонского национального технического университета.

Веретенник А.М. - кандидат технических наук, доцент, докторант Одесской национальной морской академии.

Вишневский Л.В. - доктор технических наук., профессор, декан факультета автоматики Одесской национальной морской академии.

Войтецкий И.Е. - Одесская национальная морская академия, ассистент.

Гасанов А.С. - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Международный научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН и МОН Украины.

Грыщук В.В. - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, руководитель отдела информационно-аналитических систем и средств искусственного интеллекта Государственного научно-исследовательского института информационной инфраструктуры.

Дидык А.А. - кандидат технических наук, доцент кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета.

Еременко А.П. - Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова, г. Николаев.

Ефремов Ю.И. - кандидат технических наук, доцент, Харьковский государственный университет питания и торговли.

Забитовская О.И. - аспирант кафедры экономической кибернетики Херсонского государственного аграрного университета.

Завьялова Т.П. - Национальный технический университет “Киевский политехнический институт”.

Исаев Е.А. - доктор технических наук, профессор. кафедры технической кибернетики, Херсонского национального технического университета.

Кириллов О.Л. - преподаватель Херсонского политехнического колледжа Одесского национального технического университета; соискатель кафедры „Технической кибернетики” Херсонского национального технического университета.

Клименко А.К. - кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры компьютерных систем и сетей Бердянского госпедуниверситета.

Ковриго Ю.М. - кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации теплоэнергетических процессов Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт».

Корниенко Б.Я. - канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютеризированных систем защиты информации, Национальный авиационный университет

Кроптя А.В. - магистр, аспирант Института прикладного системного анализа НТУУ „КПИ”.

Крючковский В.В. - кандидат физико-математических наук, профессор, декан факультета международных экономических отношений Херсонского национального технического университета, Заслуженный работник образования Украины.

Ладиева Л.Р. - кандидат технических наук, доцент кафедры “Автоматизация химических производств” инженерно - химического факультета Национального технического университета “Киевский политехнический институт”.

Литвиненко В.И. - кандидат технических наук, доцент, Херсонский национальный технический университет, кафедра информационных технологий

Ложечников В.Ф. - кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизации технологических процессов» Одесского национального политехнического университета.

Максименко И.Н. - кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры «Автоматизации технологических процессов» Одесского национального политехнического университета.

Мельник А.Н. - ассистент кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета.

Михайленко В.С. - кандидат технических наук, доцент кафедры «Отопления, вентиляции и охраны воздушного бассейна» Одесской государственной академии строительства и архитектуры.

Мовчан А.П. - кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Национальный технический университет Украины “КПИ”, г. Киев.

Наговский Д.А. - аспирант кафедры технической кибернетики Херсонского национального технического университета.

Никольский В.В. - кандидат технических наук, доцент кафедры «Теории автоматического управления и вычислительной техники» Одесской национальной морской академии.

Одарченко А.М. - кандидат технических наук, доцент, Харьковский государственный университет питания и торговли.

Одарченко Д.М. - кандидат технических наук, доцент, Харьковский государственный университет питания и торговли.

Передерий В.И. - кандидат технических наук, доцент; Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова.

Пляшкевич Е.Н. - кандидат технических наук, и.о. доцента кафедры экономической кибернетики, Херсонский государственный аграрный университет, кафедра экономической кибернетики.

Полищук И.А. - ассистент кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов, Национальный технический университет Украины “КПИ”, г. Киев.

Ролик А.И. - кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Национального технического университета Украины "Киевский политехнический институт".

Рыжиков Ю.Г. - кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизации теплоэнергетических процессов» Одесского национального политехнического университета.

Серета Е.С. - ассистент кафедры «Естественно-научных дисциплин» Международного университета бизнеса и права.

Слань Ю. М. - аспирант кафедры автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий (АКИТ), Национальный университет пищевых технологий (НУПТ).

Снигур А.В. - магистр кафедры автоматизации химических производств, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

Титлова О.А. - Одесская национальная академия пищевых технологий.

Тодорцев Ю.К. - доктор технических наук, профессор, заведующий каф. «Автоматизации теплоэнергетических процессов» Одесского национального политехнического университета.

Трегуб В. Г. - доктор технических наук, кафедра автоматизации и компьютерно-интегрированных технологий (АКИТ), Национальный университет пищевых технологий (НУПТ).

Фефелов А. А. - старший преподаватель кафедры Дизайна Херсонского национального технического университета.

Фоменко Б.В. - аспирант кафедры автоматизации теплоэнергетических процессов. Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев.

Хобин В.А. - доктор техн. наук, профессор кафедры автоматизации производственных процессов Одесской национальной академии пищевых технологий.

Хомченко А.Н. - заслуженный деятель науки и техники, доктор физико - математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и математического моделирования Херсонского национального технического университета.

Черевко О.И. - доктор технических наук, профессор, Харьковский государственный университет питания и торговли.

Четырин С.П. - капитан третьего ранга, начальник научно-исследовательской лаборатории Севастопольского военно-морского ордена Красной Звезды института им. П.С. Нахимова.

Шеховцов А.В. - кандидат технических наук, профессор кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета.

Шимански З. - руководитель вычислительного центра, Высшая школа предпринимательства и управление, Лодзь, Польша.

Якимчук Г.С. - кандидат технических наук, доцент кафедры технической кибернетики ХНТУ.

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ ЖУРНАЛА!

ТРЕБОВАНИЯ К РУКОПИСЯМ СТАТЕЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ЖУРНАЛА «АВТОМАТИКА. АВТОМАТИЗАЦИЯ. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ»:

1. Тексты статей (до 10 стр.) представляются в электронном и печатном виде. Аннотации - на украинском, русском и английском языках, экспертное заключение о возможности опубликования, рецензия. Сведения об авторах должны включать: Ф.И.О., адрес, телефон (домашний и служебный), место работы, научные степень и звание, должность.

2. Статьи должны отражать (Постановление ВАК Украины № 7-06/1 от 15 января 2003г.): постановку проблемы в общем виде и ее связь с важными научными практическими заданиями; анализ последних исследований и публикаций; выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящается данная статья; формулировку целей статьи; изложение основного материала исследования с обоснованием полученных научных результатов; выводы и перспективы дальнейших исследований в данном направлении.

3. Материалы, полученные некомплектно, оформленные небрежно и не в соответствии с настоящими правилами, редколлегией не рассматриваются.

4. Авторы представляют в редакцию текст статьи и аннотации в виде файла формата Microsoft Word на дискете 3,5 дюйма.

ТРЕБОВАНИЯ К ТЕКСТОВОМУ ФАЙЛУ.

Страницы: размер бумаги - 210 x 297 мм (A4), без нумерации, переносы не допускаются.

Поля: верхнее - 2 см, нижнее - 2 см, правое - 2 см, левое - 2,5 см.

Шрифт - Times New Roman. Интервал - одинарный.

Материалы представляются в следующем порядке:

- **УДК.** Шрифт - 12 пт., прописные. Абзац - без отступов, выравнивание по левому краю, интервал после - 12 пт.
- **Название статьи.** Шрифт - 14 пт., прописные. Абзац - без отступов, выравнивание по центру.
- **Фамилии и инициалы авторов.** Шрифт - 12 пт. Абзац - без отступов, выравнивание по центру, интервал до и после - 12 пт.
- **Текст статьи.** Шрифт - 12 пт. Абзац - 1,25 см, выравнивание по ширине.
- **Литература.** Слово «ЛИТЕРАТУРА»: шрифт - 12 пт, прописные; абзац - без отступов, выравнивание по центру, интервал до -12 пт., после - 6 пт. Список источников: нумерованный список, шрифт - 12 пт.; абзац - 1,25 см, выравнивание по ширине. Список источников оформляется в соответствии с требованиями ВАК Украины.
- **Рисунки.** Формат - Рисунок Microsoft Word, объект Corel raw (версия не старше 10, текст должен быть преобразован в кривые) или точечный рисунок. Положение рисунка - в тексте. Под рисунком располагается надпись вида: «Рис. 1 Название рисунка». Абзац - без отступов, выравнивание по центру, интервал до и после - 6 пт.
- **Формулы.** Набираются в редакторе формул Microsoft Equation 3.0. параметры настройки редактора: обычный - 12 пт., крупный индекс - 7 пт., мелкий индекс - 5 пт., крупный символ - 18 пт., мелкий символ - 12 пт. Абзац - без отступов, выравнивание по центру. Справа от формулы в скобках указывается её порядковый номер.
- **Таблицы.** Формат - Microsoft Word или Excel. Над таблицей справа указывается номер таблицы вида: «Таблица 1». Ниже, по центру, размещается её название. Интервал до и после - 6 пт.
- **Аннотации.** Абзац - 1,25 см, выравнивание по ширине, интервал до и после - 6 пт. Аннотации представляются на украинском, русском и английском языках. Шаблон документа для оформления материалов можно взять в редакции.

Научно-технический журнал для публикации принимает работы по следующим научным направлениям:

- моделирование объектов и систем управления
- информационно-измерительные системы
- информационно-управляющие комплексы и системы
- оптимальное управление объектами и системами
- методы построения адаптивных систем управления
- цифровые и дискретные системы управления
- современные технические средства, комплексы и системы
- энергетический менеджмент
- экономика научно-технического прогресса

Научно-технический журнал "Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы" приглашает к сотрудничеству организации на взаимовыгодных условиях. Журнал имеет общегосударственную сферу распространения.

Обращаться по адресу:

73008, г. Херсон, Бериславское шоссе, 24
ХНТУ, Редакция журнала ААЭКС
Бражнику Александру Михайловичу
т.: (0552) 552968, 326937
E-mail: aaecs@yandex.ru, app@kstu.edu.ua

Рефераты научно-технического журнала аннотируются по сети INTERNET

Работы следует направлять в редакцию журнала по адресу:

73008, г. Херсон, Бериславское шоссе, 24, ХНТУ, Редакция журнала ААЭКС
E-mail: aaecs@yandex.ru, app@kstu.edu.ua

Справки по телефонам: (0552) 552968, 326937