

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ І ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Панченко Сергій Володимирович

УДК 656.225

**МОДЕЛІ І МЕТОДИ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ
ПАРАМЕТРАМИ РУХУ ЗАСОБІВ РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ**

05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту

Дисертація на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Науковий консультант
Загарій Г .І.
д.т.н., професор

Харків – 2009

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ	17
1.1. Загальні характеристики систем керування засобами рейкового транспорту	18
1.2. Нечіткість поводження систем керування засобами рейкового транспорту	23
1.2.1. Проблеми побудови бази даних та її використання в системах керування засобами рейкового транспорту	24
1.2.2. Системи керування на основі знань	27
1.3. Особливості складних систем керування засобами рейкового транспорт	31
1.4. Завдання економії енергоресурсів в системах керування засобами рейкового транспорту	32
1.5. Аналіз основних напрямків сучасної теорії побудови контурів керування реального часу	37
1.5.1. Дослідження динаміки контурів керування рухомими одиницями	37
1.5.2. Методи оптимальної фільтрації	40
1.5.3. Оптимальне керування в контурах нижнього рівня ієрархії	43
1.5.4. Методи побудови адаптивних контурів керування	44
1.5.5. Динаміка імпульсних контурів керування	47
1.5.6. Якісна теорія гібридних контурів керування	48
Висновки. Цілі та задачі досліджень	49
РОЗДІЛ 2 КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ РЕЙКОВИМ ТРАНСПОРТОМ	54
2.1. Проблеми інтелектуалізації систем керування засобами рейкового транспорту	54
2.1.1. Міри складності систем керування засобами рейкового транспорту	61
2.1.2. Аналіз середнього рівня ієрархії систем керування засобами рейкового транспорту	62
2.2. Розроблення вимог до моделей систем керування засобами рейкового транспорту	65
2.2.1. Інтегрування та інтелектуалізація процесів керування на	

середньому рівні систем керування засобами рейкового транспорту	67
2.2.2. Контури керування нижнього рівня з моделями рухомих одиниць з розподіленими параметрами	71
2.3. Обґрунтування критеріїв оптимізації	73
2.3.1. Загальні положення	75
2.3.2. Критерій оптимізації при моделюванні на основі графових структур	77
2.3.3. Оцінка оперативності задач моделювання	85
2.3.4. Оцінка впевненості у правильності формування керуючих дій	94
2.3.5. Критерій максимального ступеня стійкості для синтезу контурів керування рухомих одиниць	97
Висновки	100

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ РОЗШИРЕНИХ ГРАФОВИХ МЕРЕЖ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ РЕЙКОВИМ ТРАНСПОРТОМ

	101
3.1. Особливості графових мереж	101
3.2. Використання мереж Петрі в організації маневрової роботи станції	104
3.3. Формалізація мови квазідвонаправлених мереж Петрі	108
3.4. Розроблення розширення – квазідвонаправлені прості й складні функціональні переходи нечітких мереж Петрі	128
3.5. Організація обчислень із використанням нових розширень нечітких функціональних переходів	137
Висновки	153

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ПІДСИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ

	156
4.1. Логіко-динамічна розподілена модель руху рухомих одиниць	156
4.2. Розроблення структури бази знань	167
4.3. Формування декларативної бази знань	169
4.3.1. Правила формування узагальненої модельної ситуації	169
4.3.2. Правила формування керуючих дій	175
4.3.3. Розроблення моделі виробничої ситуації у системі ситуаційного керування швидкістю розпуску поїздів	176
Висновки	184

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ СИТУАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО КЕРУВАННЯ РУХОМИМИ ОДИНИЦЯМИ РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ

185

5.1. Принципи організації ситуаційної системи диспетчерського керування	185
5.2. Концепція побудови моделі інтегрованої системи ситуаційного моделювання й керування	190
5.3. Формування декларативних знань для автоматичної генерації у реальному часі моделі виробничої ситуації	197
5.4. Модель ситуації, що описує наповнення рухомої одиниці	211
5.5. Модель ситуації, що описує кількість пасажирів на зупинці	214
5.6. Модель ситуації, що характеризує технічний стан рухомих одиниць	214
5.7. Модель ситуації, що характеризує стан колії	218
5.8. Розроблення продукційних знань формування локальних диспетчерських керувань	219
Висновки	229
РОЗДІЛ 6 РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ АДАПТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ СИГНАЛІВ ДЛЯ КОНТУРІВ КЕРУВАННЯ РУХОМИМИ ОДИНИЦЯМ	231
6.1 Дослідження джерел завад, діючих у контурах керування рухомими одиницями рейкового транспорту	231
6.2. Дослідження завад, які викликаються рейковими колами	238
6.3 Дослідження завад, створюваних електричними агрегатами рухомих одиниць у рейкових лініях	246
6.4. Розроблення методу адаптивної фільтрації сигналів у контурів керування для рухомих одиниць	256
6.4.1. Розроблення адаптивного фільтру	256
6.4.2. Метод побудови фільтра за критерієм оптимальності у вигляді міри відхилення вихідної величини фільтра від бажаної функції	257
6.4.3. Розробка критерія оптимальності, який враховує енергетичні параметри сигналів	263
6.5 Дослідження моделі розробленого адаптивного фільтра	269
Висновки	282
РОЗДІЛ 7 СИНТЕЗ АДАПТИВНИХ ЗАВАДОЗАХИЩЕНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ	284
7.1. Рухомі одиниці як об'єкти з розподіленими параметрами	284
7.2. Двопровідна електрична лінія з розподіленими параметрами як модель рухомі одиниці	287
7.3. Синтез адаптивного дискретного контурів керування для рухомих одиниць з ірраціональною передатною функцією	294
7.4. Розроблення процедур синтезу контурів керування для рухомих одиниць	303
7.4.1. Контур керування з ПІ-регулятором і моделлю рухомих одиниць у вигляді $W_0(x,s)=e^{-x\sqrt{s}}$	303

7.4.2. Контур керування об'єктом $W_0(x,s)=e^{-x\sqrt{s}}$ з пропорційно півінтегральним регулятором й адаптивним фільтром	305
7.4.3. Розроблення структур регуляторів для керування ОРП	306
Висновки	308
РОЗДІЛ 8 СИНТЕЗ КОНТУРІВ КЕРУВАННЯ РО, ПОДАНИХ МОДЕЛЯМИ З ЕКВІВАЛЕНТНИМ ЗАПІЗНЮВАННЯМ	310
8.1. Безпосередній синтез закону керування для контурів керування з бажаними характеристиками	310
8.2. Синтез регулятора для контурів керування, що містить адаптивний фільтр і модель рухомих одиниць у вигляді ланки першого порядку із запізнюванням	314
8.3. Розроблення процедури розрахунку параметрів адаптивних регуляторів за критерієм максимального ступеня стійкості	317
8.4. Синтез закону безпосереднього цифрового керування	327
8.5. Дослідження адаптивних контурів керування	334
Висновки	373
ВИСНОВКИ	375
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	380
Додаток А	402
Додаток Б	413
Додаток В	424
Додаток Г	436

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

- КК** – контур керування;
КМСС – критерій максимального ступеню стійкості;
МП – мережа Петрі;
ПП – процес перевезень;
РО – рухома одиниця;
СКРТ – система керування рейковим транспортом

ВСТУП

Важливим напрямком забезпечення ефективної експлуатації засобів рейкового транспорту залізниць є розроблення і впровадження перспективних автоматизованих систем керування. Створення перспективних систем керування рейковими рухомими одиницями (РО) відповідає Концепції державної програми реформування залізничного транспорту, основним директивним документам Укрзалізниці. Обставинами, які ускладнюють функціонування вказаних систем керування є зміна параметрів РО у часі, наявність випадкових збурюючих впливів і сигналів із змінними характеристиками, застарілі методи та технології керування РО. Пошук нових ідей, які спрямовані на ефективне керування РО, повинен базуватися на системному підході, основних закономірностях складних умов використання та експлуатації засобів рейкового транспорту за наявності нечітких ситуацій, на врахуванні різних збурюючих впливів і завад та створенні адаптивних контурів керування (КК) РО.

Актуальність теми. Реалізація поставленої проблеми потребує удосконалення автоматизованих систем керування засобами рейкового транспорту – РО (СК РТ). СК РТ повинні забезпечувати автоматизоване ведення графіку руху. Основним параметром, який суттєво впливає на графік руху, є швидкість РО. СК РТ повинні мати багаторівневу архітектуру, в яку інтегруються підсистеми моделювання процесів, диспетчерського формування рекомендованої швидкості; безпосереднього керування швидкістю РО. До теперішнього часу вказані підсистеми розробляються як автономні. У перспективі, коли необхідне суттєве підвищення швидкості РО, треба буде забезпечувати раціональну взаємодію різних видів транспорту, враховувати нечіткі ситуації перевезень, зовнішні збурення, що впливають на підсистеми керування РО. Тому актуальною стає науково-прикладна проблема створення концептуальних основ високоєфективного керування РО за рахунок формування раціональних задаючих впливів на підсистеми (контури) керування РО на основі методів адаптації шляхом визначення раціональної швидкості РО на різних напрямках та маршрутах перевезень та її підтримання, що у сукупності дозволить автоматизувати процес ведення графіків руху в умовах необхідності підвищення швидкості РО.

Інструментом для реалізації цієї проблеми є розроблення нових моделей та методів керування, які дадуть змогу формувати завдання для реалізації раціональної швидкості РО в складних умовах (нечіткі ситуації, збурюючі впливи, завади, які суттєво впливають на сигнали контурів керування швидкістю РО та ін.). При цьому РО слід розглядати як об'єкти з розподіленими параметрами та запізнюванням. Використання більш достовірних моделей РО для побудови адаптивних контурів керування дозволить підвищити якість процесів керування та удосконалить експлуатацію за рахунок оптимізації КК. Це дасть можливість організувати раціональний розподіл і використання вищезазначених засобів рейкового транспорту і, як наслідок, скоротити експлуатаційні витрати. Адаптивні контури керування РО

є основою для створення перспективних СК РТ залізниць. Тому підвищення ефективності автоматизованого керування засобами рейкового транспорту дозволяє кваліфікувати тему дисертації як актуальну.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до Державної програми реформування залізничного транспорту (розпорядження Кабінету Міністрів України від 27.12.2006 р. №651-р), Закону України про енергозбереження 174/94 – ВР, Закону України про інформатизацію на залізничному транспорті, Державної програми “Розвиток рейкового рухомого складу соціального призначення для залізничного транспорту та міського господарства”, введеної у дію Постановою Кабінету Міністрів України № 769 від 2.07.1998 р., Концепції створення державної інтегрованої інформаційної системи забезпечення управління рухомими об’єктами (розпорядження Кабінету Міністрів України від 17.07.2003 р. №410-р) а також науково-дослідних робіт “Розробка та дослідження алгоритмів оптимального керування електричною передачею локомотива” (ДП №0100U000821, № інв. 0205U000381), “Дослідження перспективного гібридного тягового привода на базі синхронних машин з постійними магнітами” (ДП №0107U000343), “Розроблення вихідних даних до алгоритмів програмного забезпечення релейно-процесорної централізації “РУХ” для обладнання станції Водяне Південної залізниці”.

Мета та задачі досліджень. Метою дисертації є розроблення перспективної концепції синтезу автоматизованих систем керування рухомими одиницями рейкового транспорту (СКРТ) залізниць для автоматизованого ведення графіків руху. Досягнення цієї мети передбачає постановку та вирішення на основі системного підходу таких основних задач:

–проаналізувати тенденції розвитку систем керування засобами рейкового транспорту;

–виконати аналіз існуючих методів синтезу контурів керування рухомими одиницями;

–створити концептуальний підхід, що удосконалює побудову багаторівневої СК РТ, при цьому обґрунтувати критерії оптимізації середнього та нижнього рівнів системи, які забезпечують впевненість у правильності вироблення керуючих дій у реальному часі;

–розробити комплекс логіко-динамічних моделей диспетчерських підсистем керування рухомими одиницями з врахуванням нечітких ситуацій на основі графових структур, які в найбільшій мірі відповідають географічній структурі залізниць;

–розробити базу даних, необхідних для функціонування диспетчерських підсистем керування рухом засобів транспорту з метою формування та виведення керуючих впливів, які забезпечать оптимальні параметри руху та раціональне взаєморозміщення рухомих одиниць на різних маршрутах;

–розробити метод синтезу контурів керування рухомими одиницями на основі використання у таких контурах адаптивних фільтрів та регуляторів, які враховують реальний характер зміни сигналів, параметрів рухомих одиниць та

збурюючих впливів;

–розробити універсальну модель контура керування РО, яка враховує розподілений характер рухомої одиниці як об'єкта керування, завади, які накладаються на сигнали, та використовує методи адаптації для вибору параметрів настроювання фільтрів та регуляторів;

–виконати дослідження та моделювання адаптивних контурів керування з метою оптимізації їх параметрів та формування даних для реалізації керуючих контролерів.

Об'єкт дослідження – процеси автоматизованого керування засобами рейкового транспорту.

Предмет дослідження – моделі і методи удосконалення підсистем оперативного-диспетчерського керування та контурів керування рухомими одиницями.

Методи досліджень. Методи побудови ієрархічних систем для організації автоматизованого керування засобами рейкового транспорту з використанням системного підходу. Методи функціонування організаційно-диспетчерських підсистем середнього рівня ієрархії на основі графових моделей та нечіткої логіки. Методи теорії систем керування, фільтрації, оптимального керування та адаптації для побудови завадостійких контурів керування рухомими одиницями рейкового транспорту залізниць.

Наукова новизна одержаних результатів. У дисертації вирішено науково-прикладну проблему розроблення і обґрунтування перспективної концепції синтезу систем автоматизованого керування засобами рейкового транспорту залізниць на основі теоретичного розвитку та узагальнення моделей та методів для забезпечення автоматизованого ведення графіку руху поїздів.

Наукова новизна визначається наступними положеннями:

Вперше:

1. На основі системного підходу сформульовано перспективну організацію СК РТ як ієрархічної структури, яка враховує динамічні властивості процесів у диспетчерських підсистемах, що функціонують в умовах невизначеності, а також особливості процесів у контурах керування рухомими одиницями, модель яких побудовано на основі розподіленого характеру об'єкту керування з врахуванням характеристик сигналів та зміни параметрів об'єкту, що дозволить планувати швидкість поїздів та скоротити парк вагонів та локомотивів і удосконалити експлуатацію рейкових засобів транспорту.
2. Створено комплекс логіко-динамічних моделей диспетчерських підсистем середнього рівня СК РТ на основі розробленої бази даних та нових графових структур, які функціонують в умовах невизначеності і в які на відміну від існуючих моделей введені нові розширення: квазідвонаправленість дуг та багатофункціональні нечіткі переходи, які дозволяють врахувати динаміку функціонування засобів транспорту. Це надає змогу сформулювати дані про кількість

необхідних рухомих одиниць та параметри їх руху в залежності від поточних ситуацій та значно скорочує час вироблення керуючих дій для контурів керування рухомими одиницями у нечітких ситуаціях, що у сукупності дозволить підвищити стабільність графіку руху, наприклад, пасажирських перевезень з 92 до 95%.

3. Отримані та обґрунтовані аналітичні залежності параметрів настроювання адаптивних фільтрів та регуляторів контурів керування рухомими одиницями на нижньому рівні СК РТ, які на відміну від відомих залежностей враховують зміну поточних значень сигналів та завад і розподілений характер параметрів рухомих одиниць як об'єкта керування при передачі тягових зусиль вздовж поїзда та дозволяють реалізувати нові процедури динамічної адаптації; при цьому доведено, що рухома одиниця як об'єкт керування з розподіленими параметрами може бути описаний - лінійною динамічною ланкою із еквівалентним запізнюванням. Це дозволяє більш достовірно проводити облік динамічних властивостей поїздів, як об'єктів керування, покращити якість функціонування контурів керування, та як наслідок за рахунок підвищення стабільності підтримання графіку руху, зменшити кількість непередбачуваних зупинок, нераціональних затримок поїздів всіх категорій на дільницях залізниць.
4. Синтезовано універсальну модель адаптивного завадостійкого контуру керування рухомими одиницями, яка відрізняється від відомих моделей наявністю адаптивного фільтра, адаптивного регулятора, об'єкта із змінюваним запізнюванням та схем обчислення у реальному часі сталої часу фільтра, параметрів настроювання регулятора, які отримуються шляхом поточних розрахунків у реальному часі критерію оптимізації на основі оцінки завад та параметрів РО, що у сукупності реалізує процедури динамічної адаптації вказаних параметрів. Це дасть змогу при реалізації перспективних контурів керування підвищити дільничну швидкість поїздів. При збільшенні цієї швидкості на 10%, наприклад на напрямку Куп'янськ - Одеса, може бути скорочено парк локомотивів та вагонів на 3-4% від існуючого на напрямку загального парку вагонів та локомотивів.
5. Удосконалено критерій оперативності вироблення на середньому рівні СК РТ у реальному часі керуючих дій у контури керування РО нижнього рівня, який на відміну від існуючих забезпечує впевненість у правильності вироблення керуючих дій та підвищує достовірність формування завдань для контурів керування нижнього рівня, що сприяє веденню більш стабільних графіків руху.
6. Удосконалено процедуру виділення сигналів із суміші сигнал – завада, що дає змогу будувати прості адаптивні фільтри для контурів керування рухомими одиницями, які відрізняються наявністю процедури поточного обчислення сталої часу, яка залежить від відношення рівнів корисного сигналу та завади, що удосконалює

експлуатацію рейкових засобів транспорту.

7. Подальшого розвитку набув науковий підхід, щодо синтезу контурів керування РО з регуляторами, параметри настроювання яких обчислюються неперервно на основі критерію максимального ступеню стійкості, у функціонал якого введено з додаткового параметричного виходу фільтра значення відношення сигнал-завада, що забезпечує одержання виразів для параметрів настроювання регуляторів у вигляді алгебраїчних співвідношень і на відміну від існуючих методів оптимізації параметрів контурів керування не потребує обчислення інтегралів.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено метод та комплекс моделей, які дозволили моделювати процеси керування рухомими одиницями з урахуванням критерію оперативності вироблення керуючих дій в умовах невизначеності, що забезпечує прогнозування параметрів РО. Це дає змогу диспетчерському персоналу приймати більш достовірні рішення щодо вироблення керуючих впливів. Отримані результати впроваджено на Донецькій залізниці в підсистемі диспетчерського керування (акт впровадження ДП “Донецька залізниця”).

Розроблено процедури моделювання процесів керування рухомими одиницями в умовах невизначеності, що на основі запропонованих квазідвонаправлених графових структур з новими функціональними переходами дало можливість побудувати АРМ диспетчерського персоналу для формування керуючих впливів в контури керування РО (акт впровадження ВАТ “Київ-Дніпровська МППЗТ”).

Розроблено процедури настроювання контурів керування рухомими одиницями на основі критерію максимального ступеня стійкості з врахуванням передатної функції адаптивного фільтра, що підвищило заводостійкість контурів керування та дозволило скоротити тривалість перехідних процесів, за рахунок чого може бути скорочено витрату енергоресурсів (акт впровадження СТТО “Південна залізниця”).

Розроблені нові моделі та процедури побудови підсистем керування середнього та нижнього рівнів СК РТ у сукупності являють собою концепцію створення перспективних СК РТ, що знайшло впровадження на міському транспорті (акт впровадження на Харківському підприємстві “Міськелектротранс”).

Підходи, розроблені у дисертації, використовуються у навчальному процесі УкрДАЗТ у дипломному проектуванні та при викладанні дисциплін, пов’язаних з системами керування (акт впровадження УкрДАЗТ).

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертації доповідались, обговорювались і були схвалені на:

- Міжнародній конференції «Автоматика – 2002» (м. Донецьк, жовтень 2002 р.);
- 69-й, 70-й та 71-й міжнародних науково-технічних конференціях кафедр академії та спеціалістів залізничного транспорту і підприємств (м.Харків, УкрДАЗТ, квітень 2007–2009 рр.);

- 18-й, 19-й та 20-й міжнародних науково-практичних конференціях «Перспективні системи управління на залізничному, промислового та міському транспорті» (м. Алушта, вересень 2005–2007 рр.);
- Міжнародних науково-практичних конференціях «Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті» ЕКУЗТ 2006 та ЕКУЗТ 2007 (м. Судак, червень 2006–2007 рр.);
- 1-й міжнародній науковій конференції «Ресурсозберігаючі технології в експлуатації засобів транспорту в умовах реформування залізниць України» (м. Євпаторія, травень 2007 р.);
- сесії «Информационно-вычислительные технологии в решении фундаментальных и прикладных научных задач», сесія ИВТН-2008 (м. Москва, грудень 2008 р.)
- 21-й та 22-й Міжнародних науково-практичних конференціях «Перспективні комп'ютерні керуючі та телекомунікаційні системи для залізничного транспорту» (м. Алушта, вересень 2008–2009 рр.);
- Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології на транспорті, промисловості та освіті» (м. Дніпропетровськ, травень 2009 р.).

Дисертаційна робота повністю доповідалась на: науковому семінарі кафедр «Спеціалізовані комп'ютерні системи», «Управління експлуатаційною роботою», «Автоматика і комп'ютерне телекерування рухом поїздів» Української державної академії залізничного транспорту; науково-технічній нараді Державного науково-дослідного центру Укрзалізниці; розширеному засіданні кафедри «Транспортні технології та мехатроніка автотранспортних засобів» Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення, розробки та результати досліджень, що виносяться на захист, отримані особисто автором.

Наукові праці [158, 159, 171, 177, 183, 184, 191, 215, 220, 222] виконані автором одноосібно.

У наукових працях, які опубліковані у співавторстві, особистий внесок автора такий: у [152, 157, 160, 193] - проведено аналіз досліджень мереж Петрі, введені нові їх розширення та використано розроблені розширення для побудови комплексу моделей; у [132, 151, 182, 224 – 226] – проведено аналіз багаторівневих систем, запропоновані критерій оцінки оперативності прийняття рішень з впевненістю правильності прийняття та моделі функціонування підсистем; у [109, 189, 190, 212, 213, 216 – 219, 221] – досліджено функціонування основного датчика систем залізничної автоматики – рейкових кіл, визначені напрямки їх удосконалення, оцінено вплив зовнішніх завад, запропоновано модель та метод керування виконавчими пристроями; у [92, 93, 188, 214] – сформовано метод побудови адаптивних фільтрів на основі запропонованого автором нового критерія, виконано їх дослідження; у [195, 208, 229] – запропоновано метод синтезу адаптивних контурів керування на основі критерію максимального ступеню стійкості, виконано дослідження адаптивних контурів, а також запропоновано напрямки

використання розробленого методу.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 37 робіт, серед них 27 праць у фахових наукових виданнях ВАК України, 2 патенти України та 8 додаткових праць.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, восьми розділів, висновку, та трьох додатків. Основний текст роботи складає 294 сторінки, робота включає 72 рисунки та 13 таблиць на окремих сторінках. Список використаних літературних джерел складає 229 найменувань на 21 сторінці, 3 додатки на 31 сторінці.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПРОБЛЕМИ. МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Засоби рейкового транспорту залізниць (локомотиви, поїзди) становлять стратегічний ресурс держави й вимагають ефективного керування параметрами їх руху.

Керування зазначеними засобами транспорту, включаючи його інфраструктуру, повинні забезпечувати відповідні автоматизовані системи керування СК РТ [1-17].

Функціонування СК РТ спирається на закономірності системології, що досліджує раціональну організацію складних систем [8-12]. Ця галузь науки розробляє основи й методи забезпечення ефективного функціонування систем.

Особливістю сучасного стану СК РТ є необхідність вирішення проблем їхнього вдосконалювання. Це може здійснюватися на основі аналізу й синтезу СК РТ як великих систем. Зростають вимоги до оптимальності й ефективності їх використання, що породжує ряд наукових проблем. При цьому центральне місце займає проблема створення технологічних моделей підсистем СК РТ. Результати моделювання дозволяють одержати наукові результати, які будуть використані для вдосконалювання експлуатації засобів рейкового транспорту, особливо в перспективі, коли будуть зростати швидкості перевезень.

Об'єктом керування в СК РТ є рухомі одиниці. У цілому СК РТ є складним людино-машинним комплексом.

Недосконалість існуючих СК РТ може бути компенсована використанням методів інтелектуального та адаптивного керування [13-34]. Інформаційні потоки, які характеризують функціонування таких систем, базуються на хаотично формованій семантичній і прагматичній інформації, що відображує теперішній стан перевезення людей і вантажів.

У теорії штучного інтелекту зростання питомої ваги використовуваної системою семантичної й прагматичної інформації розглядається як необхідна умова для формування баз даних і знань, що є основним об'єктом дослідження для цієї теорії. У варіанті теорії систем, запропонованій у [35], складність системи, а значить, її інтелектуальність, прямо зв'язується саме із семантикою й прагматикою інформації.

Необхідність створення інтелектуального рейкового транспорту, як окремого й самостійного виду транспорту, була розглянута в [36, 37], де тенденції у відокремленні інтелектуального транспорту пов'язувалися з посиленням ролі інформаційних ресурсів у житті сучасного суспільства.

У теперішній час проводиться велика кількість досліджень у галузі штучного інтелекту для потреб залізниць. Основна мета таких досліджень – організувати й реалізувати ефективні автоматизовані, а у перспективі – автоматичні технології керування засобами рейкового транспорту.

Дотепер СК РТ базувалися на традиційних методах системології й теорії керування [8, 9, 38-55]. Проте, залишається широкий клас реальних завдань,

які потребують нових підходів для їх удосконалення.

Найважливіше місце в СК РТ займають різні підсистеми (контури) безпосереднього керування РО, які традиційно розглядалися як автономні. У складних умовах перевезень вони повинні розглядатися як складова частина багаторівневих СК РТ.

Ефективність функціонування СК РТ багато в чому визначається енергоспоживанням нижнього рівня (рис. 1.1), що, у першу чергу, залежить від раціонального функціонування контурів керування РО.

1.1. Загальні характеристики СК РТ

У теперішній час проблема вдосконалення СК РТ має першочергове значення. Особливо це відноситься до рейкового залізничного транспорту.

Залізничний транспорт як складний інтегрований об'єкт керування характеризується розвиненою інфраструктурою, зв'язком з великим числом підприємств різних галузей промисловості, іншими видами транспорту, значним енергоспоживанням, негативним впливом на навколишнє середовище

СК РТ повинні здійснювати:

- збирання і обробку інформації про стан полігонів залізниць та зовнішнього середовища (підприємств галузей, що обслуговуються, інших видів транспорту – морський, річковий, автомобільний);
- аналіз одержуваної інформації;
- формування раціональних керуючих впливів (на основі вироблення керуючих дій) на РО, що здійснюють перевезення.

Як видно з рис. 1.1, за своєю структурою й характером функціонування СК РТ є складною ієрархічною системою [55].

Основою технологічних процесів залізничного транспорту є керування швидкістю РО, яка суттєво впливає на автоматизоване ведення графіку руху. При цьому необхідно підтримувати раціональну швидкість їх руху в залежності від стану технологічного процесу перевезень.

Складною системою будемо називати ієрархічно організовану й цілеспрямовано функціонуючу сукупність великого числа зв'язаних і взаємодіючих підсистем керування технологічними процесами перевезень [54, 55]. Складна система здатна на основі інформації про зовнішнє середовище послідовно змінювати свою структуру або значення своїх параметрів таким чином, щоб у більшій мірі відповідати цільовому призначенню.

Всім цим визначенням відповідають досліджувані в дисертації системи.

Складна система функціонує у відображеному на рис. 1.1 хаотично змінюваному зовнішньому середовищі, яке знаходиться під впливом збурень [8, 12, 55].

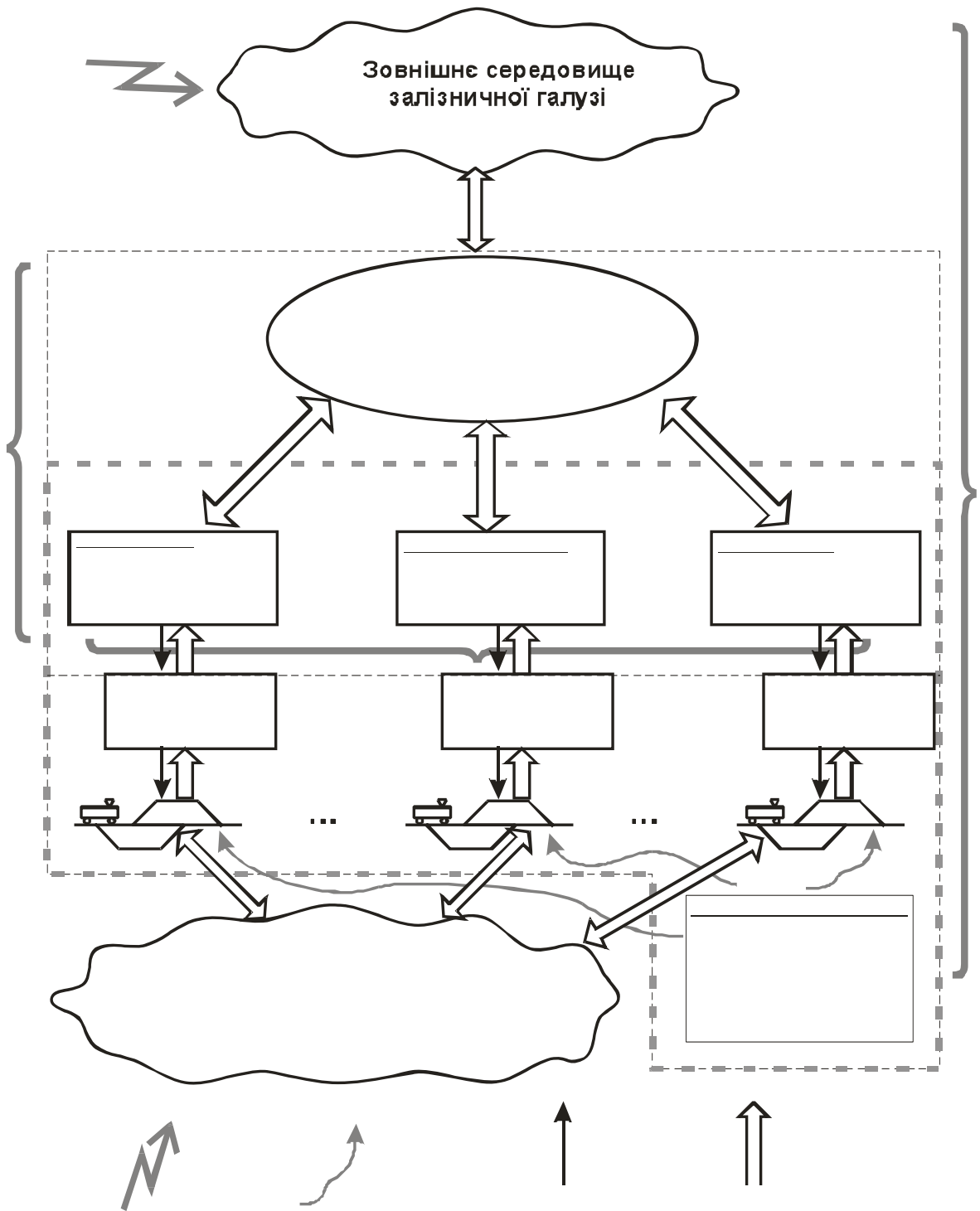


Рис. 1.1. Структура складної ієрархічної СК РТ

У кожен момент часу зовнішнє середовище характеризується вектором зовнішніх параметрів

Стан і властивості системи у кожен момент часу характеризуються вектором внутрішніх параметрів і вектором сформованих керуючих дій, що задаються, на контури керування РО. У контурах керування нижнього рівня формується вектор керування

Сукупність співвідношень між зовнішніми й внутрішніми параметрами СК РТ, які характеризують структуру системи і її функціонування, утворює модель СКРТ.

Ефективність СК РТ, тобто ступінь її пристосованості для реалізації необхідних параметрів засобі рейкового транспорту, забезпечується організацією раціонального руху РО й оцінюється чисельними значеннями компонентів векторної цільової функції:

У наведені вирази можуть входити не тільки параметри, але і їхні похідні.

У реальних умовах реалізації автоматизованого керування засобами рейкового транспорту стан зовнішнього середовища є невизначеним (нечітким).

Природним результатом невизначеності поточного стану зовнішнього середовища перевезень є невизначеність його майбутнього стану. У зв'язку із цим виникає проблема зниження невизначеності відносно майбутнього стану системи. Це ускладнює функціонування диспетчерських підсистем середнього рівня, які здійснюють координацію роботи контурів нижнього рівня.

Рішення проблеми може бути здійснене шляхом інтелектуалізації СК РТ і **моделювання варіантів функціонування** підсистем середнього рівня з метою використання результатів моделювання для прогнозування й формування керуючих дій на КК нижнього рівня.

Особливістю СК РТ як складної системи є ієрархічність її структури й відповідно керування. Це пов'язане з можливістю централізації й децентралізації окремих функцій системи. У таких системах верхній рівень є централізованим; середній децентралізованим стосовно верхнього рівня й

централізованим у межах залізниці; нижній рівень децентралізованим. Верхній і середній рівні останнім часом стають усе більше децентралізованими шляхом створення локальних обчислювальних мереж (ЛОМ), АРМів і використання GRID технологій [56].

Принциповою особливістю СК РТ є наявність у ній людини-оператора (диспетчера). Він здійснює оцінку інформації; виконує роль ретранслятора, що передає інформацію від однієї частини або елемента системи до інших; аналізує інформацію про керування РО на перегонах і станціях і приймає необхідні рішення, тобто виробляє керуючі дії; здійснює спостереження й контроль функціонування системи або окремих її підсистем; є виконавцем пріоритетних команд від верхніх рівнів систем.

При дослідженні функціонування складних СК РТ необхідно враховувати їхні специфічні особливості, до яких відноситься хаотичність виміру стану зовнішнього середовища в кожний момент часу, а також неточність опису даних. Математичний апарат для цього підходу відомий як "теорія нечітких множин" [17-19].

1.2. Нечіткість поводження СК РТ

Нечіткість і невизначеність у СК РТ викликається рядом причин, до яких відносяться:

- помилки виміру ряду величин, що характеризують процеси керування РО;
- відсутність вимірювання ряду параметрів зовнішнього середовища (наприклад, через відсутність датчиків).

Одним зі шляхів зниження невизначеності є використання сучасних методів фільтрації, що забезпечують *виділення сигналів із суміші сигнал-завада*.

З огляду на те, що характеристики завад у СК РТ змінюються в часі, *необхідно розробити метод адаптивної фільтрації*.

Фактор нечіткого поводження є одним з фундаментальних допущень, що лежать в основі побудови перспективних СК РТ. Велика кількість ступенів свободи приводить до того, що всі варіанти поводження системи не можуть виявитися й бути вивченими в доступному для огляду проміжку часу. Процеси кількісної і якісної зміни, що протікають іноді значними темпами, наприклад, при технічному переозброєнні засобів транспорту, викликають необхідність періодично переглядати наявні знання й базовані на них принципи автоматизованого керування засобами транспорту.

Таким чином, знання про СК РТ принципово неповні. Облік нових знань, що з'являються в процесі функціонування, вимагає модернізації системи керування. Тому СК РТ повинні розвиватися разом з зміною об'єкта керування – засобів рейкового транспорту.

Знання про процес керування РО визначають поточну процедуру формування керуючих дій, принципи спостережень і впливу на об'єкт. СК РТ мають важливу особливість знання про них мають порівняно велику динамічну складову, яку необхідно враховувати навіть в оперативному

керуванні.

1.2.1. Проблеми побудови бази даних та її використання в СК РТ

Високий рівень обґрунтування керуючих дій, що приймаються у СК РТ, не може бути досягнутий без пристосування системи до зміни об'єкта й рівня знань про нього.

СК РТ відносяться до класу критичних систем керування, у яких важлива готовність до формування керуючих дій в умовах надзвичайної ситуації, коли особливого значення набуває здатність формувати керуючі дії в умовах неточності, невизначеності, неоднозначності й нечіткості оперативної інформації. Ця здатність може бути реалізована шляхом використання **правил формування керуючих дій**, коли керування формується на основі правил опису ситуацій, складених експертами з даної предметної галузі знань, що в сукупності реалізує компетенцію персоналу.

Компетенція в СК РТ виникає при систематичному накопиченні досвіду взаємодії з технологічним процесом. Зростання компетенції вимагає вдосконалювання СК РТ: процедур ухвалення рішення, засобів спостереження, виміру параметрів і впливу на РО. На сучасному етапі побудови СК РТ виявляється дія таких негативних факторів, що заважають систематичному зростанню компетенції персоналу:

1. Знання, які задіяні системою керування, розподілені по управлінському й виконавчому персоналу. Якщо в процесі вироблення рішення необхідно застосувати знання відразу по декількох спеціалізаціях, то виникають тривалі процедури узгодження рішення між підрозділами й відомствами.

2. Не відбувається систематичного накопичення знань у системі керування. Систематичне накопичення й трансляція досягнутого рівня знань персоналом СК РТ можливі тільки в деяких обмеженнях.

3. Існуюча інфраструктура не передбачає можливості поповнення системи керування новими знаннями. Створення, передача, накопичення й обробка оперативної інформації про об'єкт керування відбуваються за шаблоном. Разом з тим, кожне спостереження може додавати нове знання про об'єкт керування, що у перспективі підвищить ефективність керування.

Наведені фактори встановлюють об'єктивну межу зростання компетенції в СК РТ. Існуючі методи забезпечення зростання, концентрації й розподілу компетенції, такі як Brain Storming, Case Study [57, 58], "принцип акваріума" і деякі інші можуть бути дуже ефективні при рішенні конкретного локального завдання, однак, мають істотні обмеження з погляду забезпечення систематичного зростання компетенції по організації в цілому й на великому проміжку часу: вузьке коло задіяного персоналу, нерегулярність, відсутність активного сховища знань.

Інший напрямок створення бази даних і механізму її використання в СК РТ. Це пов'язано з подоланням проблем великого обсягу, складності й невизначеності тої сукупності знань, що реально використовується у керуванні

У прийнятті рішення ситуаційною процедурою нечіткого висновку задіюється "поле знань", невизначене не тільки за обсягом, але й за розмірністю. У процесі вироблення керуючих дій повинні враховуватися динамічно змінювані економічні, технологічні, кадрові, організаційні, природні й інші аспекти технологічного процесу керування засобами рейкового транспорту. Проблема створення й використання бази даних СК РТ це проблема створення й використання поліпредметної бази великих розмірів.

Наприклад, побудова інформаційно-аналітичної системи для керування безпекою СК РТ Укрзалізниці вимагає адекватного відбиття в базі знань істотних з погляду безпеки характеристик таких структурних і функціональних елементів системи: регіональних відділень, тисяч кілометрів магістралей, десятків видів одиниць рухомого складу, декількох сотен станцій, десятків видів спеціалізацій персоналу й т.д. База даних, що дозволяє розподіленій інформаційно-аналітичній підсистемі проводити оцінювання стану безпеки й управляти комплексом заходів за попередніми оцінками повинна містити тисячі, а, можливо, й десятки тисяч правил. Побудова такої бази традиційними методами (робота з експертами або вилучення знань із оперативної інформації на основі нейромережових підходів) була б надзвичайно коштовною, тривалою і економічно невиправданою; справою хоча б тому, що поточні технологічні зміни системи зведуть нанівець актуальність бази ще до її уведення в експлуатацію.

Отже, створення й використання баз даних у СК РТ повинні базуватися на принципах, що істотно відрізняються від принципів побудови традиційних експертних систем:

- на відміну від вузьких областей прийняття рішень, наприклад, інтерпретації сигналів, що надходять із рейкових кіл на фоні завад, виникає питання про границі предметної області, критерії і механізми цілеспрямованого відбору знань, істотних для формування керуючих дій;
- процес створення бази даних СК РТ не може відбуватися поза системою керування й не повинен припинятися. База СК РТ повинна бути не просто наповнена знаннями, вона повинна розвиватися разом з об'єктом керування й рівнем знання про нього;
- спосіб подання знань повинен забезпечувати подання знань не в якій-небудь одній спеціалізації персоналу, а для системи керування в цілому;
- оскільки у теперішній час в СК РТ не може відбуватися збільшення персоналу (частина персоналу займається оперативним керуванням, інша частина забезпечує одержання знань), повинен бути забезпечений синтез процесів оперативної роботи й одержання нових знань на рівні структури оперативної інформації.

Використання великої бази даних для вироблення керуючих дій потребує відповідної кількості вихідних фактів, інтерактивних процесів вибору й підтвердження проміжних результатів.

1.2.2. Системи керування на основі знань

Як показано в [13, 14], проблеми побудови й адаптації баз знань можуть бути вирішені при побудові продукційних ситуаційних підсистем нечіткого висновку.

Для перспективних СК РТ корисні розроблення й створення працюючих у реальному масштабі часу бортових і наземних контурів керування, здатних при впливі випадкових факторів функціонувати також "добре", як і досвідчена людина-оператор (при низьких швидкостях руху), а, можливо, й ще краще (при високих швидкостях, тому що в цьому випадку фізіологічні можливості машиністів знижуються). Крім того, інтелектуалізація СК РТ пов'язана також з необхідністю керування РО не тільки в умовах нормального функціонування, але й при наявності збоїв у процесі керування.

Такий тип систем керування в теорії штучного інтелекту називають системами керування на основі знань.

СК РТ, що функціонує в реальному часі на основі знань, повинна містити в собі такі підсистеми: базу даних, підсистему вироблення керуючих дій, що працює в реальному часі, підсистему попередньої обробки інформації в реальному часі. Ці підсистеми організуються у загальну ієрархічну структуру.

Вищий рівень у цій ієрархії утворюють база даних і підсистема висновку. На даному рівні виконуються всі логічні вироблення керуючих дій вищої складності й здійснюються процедури ухвалення рішення, такі, як визначення збоїв у роботі транспортного комплексу, діагностування ситуації й вибір процедур керування. У підсистемі висновку необхідно приймати рішення в реальному часі на основі даних, що зберігаються в базі, і виходячи з поточного стану процесу керування рейковими засобами залізниць.

Системи керування на основі знань призначені для контролю об'єктів і керування ними, а не для забезпечення консультації з тієї або іншої проблеми, що виникають в процесі функціонування. Така система повинна працювати в безперервному інтерактивному режимі в реальному часі. Для безперервного контролю характеристик об'єкта система керування на основі знань використовує схеми попередньої обробки інформації. При виявленні якої-небудь аномалії в роботі підсистема висновку повинна автоматично входити в режим діагностування, у якому будуть локалізовані можливі причини аномалій і вироблені відповідні коригувальні керуючі дії. При цьому оператор системи керування на основі знань не включається в контур ухвалення рішення, а всі рішення приймаються автономно самою системою.

Сучасні інтелектуальні системи, що функціонують у реальному часі, можна розділити на три групи:

- експертні системи, призначені для розв'язування завдань керування в реальному часі;
- підсистеми інтелектуального керування, методологічною основою якого є теорія інтелектуальних машин [59, 60];
- системи експертного контролю за адаптивними й неадаптивними регуляторами з використанням бази даних.

Експертні системи, призначені для розв'язування завдань керування в реальному часі. В [14] запропоновано використовувати поширення методів

традиційних експертних систем на розв'язування завдань керування динамічними об'єктами в реальному часі. При цьому моделювання стратегії керування об'єктом, прийнятої оператором, здійснюється в рамках нечіткої, або заснованої на правилах, методології, тобто використовувані правила заміняють традиційні алгоритми керування. Таке моделювання базується на застосуванні якісних, логічних правил для вибору керуючого сигналу в різних ситуаціях.

Теорія інтелектуального керування досліджує найбільш загальні прикладні завдання керування [61].

В 1971 р. було уведено поняття інтелектуального керування як області, що лежить на перетині штучного інтелекту й автоматичного керування. За останній час зроблена велика кількість спроб довести формалізацію цієї області до рівня спеціальної наукової дисципліни з відповідною математикою [62, 63].

Стосовно до технологічних процесів керування рейковими засобами залізниць найбільш удалий підхід може бути запропонований на основі робіт [59-61], в яких формуються вимоги до інтелектуального керування як області знань, що лежить на перетині штучного інтелекту, дослідження операцій і автоматизованого керування. В цих публікаціях визначено інтелектуальне керування як процес, що автономно веде деякий інтелектуальний об'єкт до досягнення заданої мети. При цьому під інтелектуальними маються на увазі процеси, здатні замінити людей при виконанні небезпечної, здійснюваної дистанційно, стомлюючої або високоточної роботи. Як узагальнюючий результат запропоновано систему ієрархічного оптимального керування, що складається із трьох основних рівнів інтелектуальності, або точності:

- рівня організації (з базою знань) з функціями міркування, планування й прийняття рішень з організації процесу розв'язування завдання (ці функції в основному базуються на методах штучного інтелекту);
- рівня узгодження, що здійснює взаємодію між верхнім і нижнім рівнями інтелектуалізації, з функціями, спрямованими на узгодження роботи нижнього рівня (дані функції, як правило, засновані на методах штучного інтелекту й дослідження операцій);
- рівня виконання, що є нижнім рівнем, з високими вимогами до точності та функцій, які базуються на методах теорії автоматичного керування.

В СК РТ завдання, розв'язувані на рівні виконання, мають містити у собі вибір контуру керування для РО, що задовольняє певними обмеження, які задаються разом з вихідними даними. При цьому проблему керування можна розглядати як вибір найкращого регулятора в сенсі відповідності до умови поставленого завдання.

В [61] показано, що можна встановити взаємооднозначну відповідність між завданнями теорії інформації й оптимального керування та таким чином уніфікувати підходи як до теорії інформації, так і до теорії керування зі зворотним зв'язком на основі деякої загальної міри поведінки, у ролі якої виступає ентропія.

Таким чином, теорію інтелектуального керування можна розглядати як математичне завдання знаходження раціональної послідовності рішень і формування керуючих дій для деякої системи, структурованої відповідно до принципу підвищення інтелектуальності. При цьому дана послідовність мінімізує повну ентропію системи.

Підхід до експертного контролю спочатку був запропонований в [64]. Отримані процедури експертного контролю складаються з інтелектуальної комбінації різних процедур керування, ідентифікації й контролю.

Для забезпечення прийнятної якості функціонування таких систем у більшості випадків повинні виконуватися певні обмежуючі умови, що накладаються на об'єкт керування і його вхідні сигнали. Було показано [65], що за допомогою методів експертних систем можна задовільно контролювати виконання подібних умов і здійснювати необхідні керуючі дії тоді, коли ці умови змінюються.

Експертне керування пов'язане з методами адаптації. Розвиток даного підходу дозволяє усунути недоліки, властиві сучасним адаптивним регуляторам, де потрібні апріорні знання про об'єкт керування. Експертне керування містить у собі дві проблемні області. Перша з них визначає обсяг знань про об'єкт, який необхідно мати для того, щоб автоматично настроїти регулятор і здійснити спостереження за об'єктом, а також технологію одержання цих знань, тобто про навчальну процедуру. Друга область це подання й використання знань.

Експертне керування базується на тім припущенні, що немає універсальних алгоритмів адаптивного керування або, принаймні, вони не можуть бути застосовані на практиці.

Після того, як регулятор розроблений, система експертного керування перемикається на режим керування зі зворотним зв'язком. У цьому режимі здійснюється контроль замкнутого контуру для виявлення ситуацій, які вимагають підстроювання параметрів алгоритмів керування або повного перенавчання.

Отже, перспективна СК РТ повинна являти собою комплекс організаційно-економічних і технічних рішень, що забезпечують автоматизоване керування рейковими засобами залізниць у хаотичних нечітких умовах.

1.3. Особливості складних СК РТ

Аналіз показав, що існуючі СК РТ мають такі особливості:

- відсутній повний математичний опис, тобто відсутні алгоритми (правила, процедури, інструкції) керування в мінливих, іноді непередбачених ситуаціях;
- стохастичність поведіння. Це обумовлено не стільки наявністю випадкових завад у підсистемах керування, скільки складністю й нечіткістю інформації про процеси;
- нестационарність технологічного процесу керування засобами транспорту. Вона впливає з його складності. Це проявляється в дрейфі

характеристик (параметрів) об'єкта, тобто в еволюції перевезень у часі, що створює труднощі при синтезі моделі складного процесу керування.

Наслідком цього є неповторюваність експериментів, що проявляється в різній реакції об'єкта на ту саму ситуацію або на те саме керування в різні моменти часу залежно від обмежень, які змінюються. Це необхідно враховувати при синтезі моделей підсистем керування, для чого вводиться їх корекція на основі бази даних та інтелектуального керування.

Ефективний спосіб врахування цих властивостей екстраполяція поведінки процесу та урахування можливих змін, одержуваних у результаті моделювання й прогнозування на його основі.

Після визначення характерних рис підсистем слід зазначити, що в існуючих СК РТ не приймаються рішення щодо ефективного функціонування нижнього рівня (контурів керування РО).

Перш ніж проаналізувати особливості функціонування нижнього рівня, розглянемо завдання енергозбереження в СК РТ, які вимагають нового підходу до побудови контурів керування для РО.

1.4. Завдання економії енергоресурсів в СК РТ

Залізничний транспорт України є досить енергоємною галуззю народного господарства. У теперішній час за питомою витратою паливно-енергетичних ресурсів на одиницю виконаної роботи з перевезень засобами рейкового транспорту він є найбільш економічним у порівнянні з іншими видами транспорту.

Це ілюструє рис. 1.2.

В Україні на залізничний транспорт припадає більша частина вантажних перевезень і близько половини пасажирообігу (рис. 1.3).

У цілому залізниці України забезпечують вантажні й пасажирські перевезення. Пасажирські перевезення в основному характеризуються стабільністю й детермінованістю руху поїздів. Вантажні перевезення відрізняються нестаціонарністю й у ряді випадків хаотичністю процесів.



Рис. 1.2. Порівняльне співвідношення витрат енергоресурсів при реалізації технологічних ПП на 1 ткм різними видами транспорту

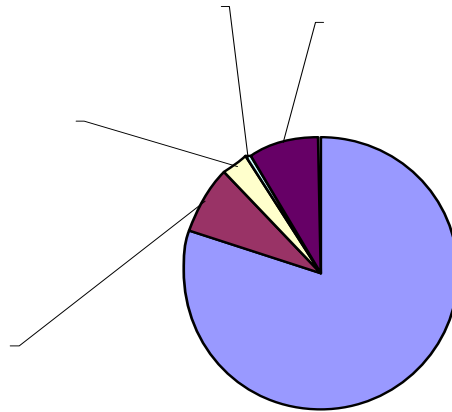


Рис. 1.3. Обсяги вантажообігу різних видів транспорту

Вантажні перевезення на мережі залізниць України забезпечують:

- 1259 станцій, відкритих для вантажних операцій;
- 67 прикордонних (припортових) переходів;
- 31 механізована дистанція вантажно-розвантажувальних робіт;
- 241 контейнерний термінал (у тому числі 47 для великотоннажних контейнерів).

Мережна сортувальна робота виконується на 49 станціях.

На залізницях України експлуатується:

- 224062 вантажних вагони;
- 1877 магістральних тепловозів;
- 2039 маневрових тепловозів;
- 1931 електровоз;
- 146800 контейнерів, у тому числі 22200 великотоннажних.

У середньому за добу на станціях залізниць України орієнтовно завантажується 12500 і вивантажується 13400 вагонів.

Середньомісячна кількість оброблюваних документів, які супроводжують перевізний процес, орієнтовно:

- щодо відправлення – 560000 одиниць;
- щодо прибуття – 520000 одиниць;
- щодо транзиту вантажів – 83000 одиниць.

Основний вид енергетичних ресурсів, що забезпечують реалізацію технологічних процесів на залізницях України, – це електроенергія й дизельне паливо. Причому їхня частка в загальному балансі енергоспоживання приблизно становить 60 і 10 % відповідно (інша частка електроенергії до 30 % споживається системами автоматизації технологічних процесів пасажирських, сортувальних станцій і різних депо).

Економія цих енергоресурсів вимагає формування концепції ефективного керування засобами рейкового транспорту залізниць. При цьому необхідно враховувати:

- нові ринкові умови діяльності залізниць, при яких ставляться високі вимоги до економії енергоресурсів;
- фактичне зростання вартості енергоресурсів, особливо дизельного палива;
- доцільність все більшого використання електротяги (електровози), тому що значна частка локомотивів (тепловозів) при автономній тязі приводить до зростання витрати дизельного палива;
- раціональність автоматизованого керування рейковими засобами на основі побудови ефективних СК РТ із застосуванням методів адаптації.

Аналіз основних каналів втрат енергетичних ресурсів на залізничному транспорті України дозволяє визначити основні науково-технічні рішення щодо підвищенню ефективності енергоспоживання на перспективу. Основні напрямки в цьому виді діяльності наведені у табл. 1.

Основна частка в енергозбереженні може бути забезпечена вдосконаленням контурів керування РО. У формуванні питомих витрат енергоресурсів на тягу поїздів беруть участь практично всі основні підрозділи

(господарства) залізниць України. У забезпеченні енергозбереження найбільш важлива роль повинна приділятися раціональній організації керування рейковими транспортними засобами (диспетчерський контроль і керування на основі прогнозування ситуацій); енергозаощаджуваному керуванню рухом поїздів на основі використання методів інтелектуального й адаптивного керування.

Важливу роль в енергозбереженні відіграє заміна застарілих систем станційної і гіркової автоматики (вони відрізняються значним енергоспоживанням) новими мікропроцесорними системами, що мають приблизно на порядок менше енергоспоживання.

Напрямки удосконалення РО

Таблиця 1.

Напрямок використання	Заходи щодо реалізації технологій енергозбереження
Автоматизоване керування засобами рейкового транспорту на залізничному транспорті	Збільшення дільничної швидкості руху, рівня завантаження вагонів, зниження частини недовантажених і порожніх вагонів, зменшення порожніх пробігів локомотивів, зменшення числа непередбачених зупинок і простоїв поїздів
Моделювання технологічних ситуацій автоматизованого керування РО	Використання результатів моделювання з метою оперативного формування дій щодо керування швидкістю РО
Забезпечення тяги поїздів	Збільшення відсотка використання потужності тепловозів і електровозів зі зменшенням частки перших; застосування енергозберігаючих технологій <i>шляхом створення перспективних адаптивних контурів керування рухомими одиницями</i>

<p>Удосконалення контурів керування тягового рухомого складу:</p> <ul style="list-style-type: none"> – електровози, – електропоїзди <p>– тепловози й дизельні поїзди</p>	<p>Використання рекуперативного гальмування в широкому діапазоні швидкостей руху; зменшення втрат на пуск; компенсація реактивної потужності; оптимальний розподіл керування окремими секціями й групами тягових двигунів шляхом <i>створення інтелектуальних заводостійких адаптивних контурів керування РО</i> на основі: адаптивної фільтрації сигналів, що спостерігаються на фоні інтенсивних завод, характеристики яких змінюються; реалізації адаптивних законів регулювання; підвищення ефективності рекуперативного гальмування; застосування раціональних методів формування складу поїздів</p> <p>Заміна застарілих тягових одиниць новими (в окремих випадках – заміна тільки дизелів) з метою підвищення ККД шляхом створення <i>оптимальних контурів керування агрегатами й поїздом у цілому</i> (турбонаддув, розігрівання, гарячий відстій та ін.) на основі адаптивної фільтрації, оптимального адаптивного керування, що забезпечують скорочення тривалості перехідних процесів</p>
--	---

Основну частку в енергозбереженні повинні забезпечувати контури керування РО, що дають можливість реалізувати оптимальне керування агрегатами локомотивів і поїздів. При цьому важливого значення набуває скорочення тривалості перехідних процесів у КК.

Нижче розглянуто сучасний стан теорії керування, основні результати якої можуть бути використані як основа для побудови перспективних контурів керування РО.

1.5. Аналіз основних напрямків сучасної теорії побудови контурів керування реального часу

Виходячи зі структури ієрархічної СК РТ (рис. 1.1) можна запропонувати узагальнену структуру контуру керування РО, показану на рис. 1.4.

Середній рівень ієрархії системи формує керуючі дії щодо завдання швидкості руху РО на основі інформації, одержуваної з підсистем диспетчерської сигналізації. Контури керування (КК) на нижньому рівні ієрархії містять адаптивний фільтр і адаптивний регулятор.

Паралельно об'єкту включено його модель, різниця вихідних сигналів об'єкта і його моделі використовується в блоці підстроювання параметрів регулятора. У цьому ж блоці враховується різниця сигналів виходу КК і його моделі.

У цілому КК являє собою складну структуру, для реалізації якої потрібно використовувати сучасні методи теорії керування.

1.5.1. Дослідження динаміки контурів керування РО

Після появи перших динамічних систем з негативним зворотним зв'язком, описуваних системою лінійних диференціальних рівнянь із постійними коефіцієнтами, стали розвиватися методи їх дослідження [66-75].

РО у загальному випадку є складними електромеханічними об'єктами, до складу яких входять тягова одиниця та ланцюг вагонів.

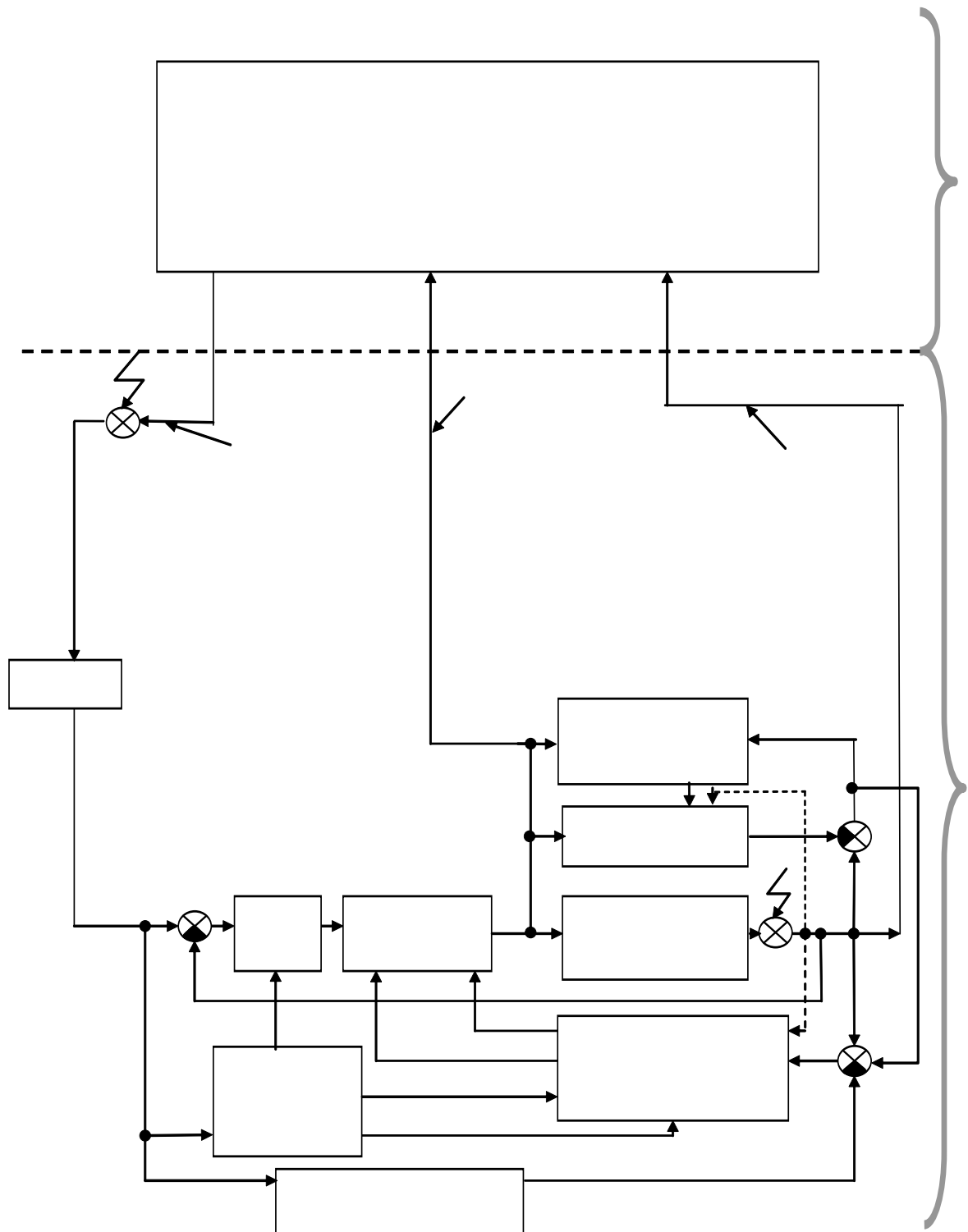


Рис. 1.4. Структура контуру керування рухомою одиницею

Як показав В. А. Лазарян [76], РО такого класу описуються лінійними системами диференціальних рівнянь із періодичними коефіцієнтами. Відомо, що в цих РО за певних умов можливий параметричний резонанс. На відміну від звичайного резонансу змушених коливань, що виникає в результаті збігу частоти зовнішнього аддитивного збурювання із власною частотою коливань механічної системи, при параметричному резонансі коливання звичайно зростають у часі за експонентним законом і в меншому ступені компенсуються силами тертя, що робить їх особливо небезпечними в тих прикладних завданнях, у яких бажано уникати резонансних явищ. В.А. Лазаряном проведені теоретичні дослідження перехідних процесів руху поїздів, складних механічних транспортних об'єктів, які підкріплені експериментальними дослідженнями в натурних поїздах і постановкою лабораторних експериментів на моделях поїзда. Ним створена теорія стійкості руху рейкових транспортних засобів.

З огляду на те, що в загальному випадку КК є нелінійними, наприкінці 50х років румунський математик В.М. Попов використовував для аналізу абсолютної стійкості нелінійних КК метод апріорних інтегральних оцінок і одержав достатні умови стійкості в частотній формі, які інваріантні щодо лінійних неособливих перетворень координат і зручні для додатків. Ним же було показано, що ці умови необхідні для існування функції Ляпунова певного класу. Чи є вони для цього й достатніми? Позитивна відповідь на це питання була отримана в 1962 р. В.А. Якубовичем у вигляді частотної теореми, що стала згодом знаменитою [77], і яку часто називають лемою Якубовича - Калмана або Калмана - Якубовича - Попова. Робота Р. Калмана [78], опублікована роком пізніше, містить інший доказ. Ця теорема дає ефективні умови можливості розв'язання нелінійних рівнянь й дозволяє будувати функції Ляпунова певних класів як для дослідження абсолютної стійкості, так і для вивчення нестійкості й автоколивальності нелінійних КК. Вона знайшла широке застосування не тільки в дослідженнях динаміки нелінійних КК, але й у теорії оптимального й адаптивного керування та оптимальної фільтрації.

В 60-ті роки в прикладній математиці було зроблено важливе відкриття - за допомогою комп'ютерних експериментів була виявлена можливість "хаосу" у гладких динамічних системах [79]. До теперішнього часу зусиллями багатьох учених створена теорія хаосу. Поширення цієї теорії для КК з напівпровідниковими перетворювачами електропривода для РО отримано в [80]. Знайдено необхідну й достатню умову існування біфуркації в системі Лоренца, що відповідає гомоклінічній орбіті сідла; використані функції Ляпунова в оцінці ляпуновської, хаусдорфової і фрактальної розмірності атракторів; з їхньою допомогою доведена гіпотеза Ідена про оцінку розмірності атрактора Лоренца.

В 1986 р. був запропонований метод стабілізації нестійких нелінійних КК з періодичним зовнішнім впливом [81]. Надалі цей метод був розвинений для синхронізації хаотичних коливань [82].

1.5.2. Методи оптимальної фільтрації

Еволюція науково-технічних концепцій синтезу систем автоматичного керування пройшла шлях від детермінізму до використання досконалих статистичних моделей вхідних впливів.

Методи оптимальної лінійної фільтрації Вінера-Колмогорова [83] та Калмана-Б'юсі [84] підтвердили перемогу статистичного підходу до задач синтезу фільтрів. Однак ситуація ускладнюється тим, що побудувати достатньо повні статистичні моделі вхідних впливів у багатьох практичних випадках не вдається [67]. Тому оптимальна фільтрація потребує розроблення методів, які можна використати у різних практичних випадках, наприклад, у КК засобами рейкового транспорту.

Можливі різні постановки завдання фільтрації (обробки сигналів з завадами з метою виділення корисних сигналів). Найбільше визнання одержали теорія Вінера-Колмогорова оптимальної фільтрації стаціонарних процесів і теорія рекурентної фільтрації Калмана-Б'юсі. У кожній із цих теорій критерієм оптимальності є середньоквадратична похибка фільтрації, але в теорії Вінера-Колмогорова не передбачається завдання параметричної моделі частково-спостережуваного процесу, тоді як у теорії Калмана-Б'юсі такою моделлю є скінченновимірний формуючий фільтр (можливо, нестационарний), збуджуваний білозавадним процесом. В [85] розвинена загальна теорія лінійної оптимальної фільтрації, у рамках якої теорії Вінера-Колмогорова й Калмана-Б'юсі виступають як її спеціальні варіанти.

Розвинутий в [86] варіант теорії фільтрації дозволив вирішити ряд завдань оптимальної фільтрації нестационарних процесів, що не відповідає теорії Калмана-Б'юсі. В [87] дано подальший розвиток теорії лінійної фільтрації. Встановлено глибокий зв'язок задач оптимальної (за середньоквадратичним критерієм) лінійної фільтрації з лінійно-квадратичним завданням оптимального керування, розроблена теорія спектральної факторизації лінійних позитивних операторів у дискретному причинному гільбертовому просторі і отриманий абстрактний аналог методу Вінера розв'язання завдання оптимальної фільтрації (що дозволило в рамках абстрактної теорії фільтрації одержати подання оптимального фільтра у формі Боді-Шеннона). В [88] підведені також певні підсумки розвитку абстрактної теорії лінійної оптимальної фільтрації й описані різноманітні прикладні завдання, у тому числі завдання (у різних постановках) виділення сигналу (із суміші сигнал-завада).

При синтезі адаптивних систем велике значення має форма алгоритмів навчання (адаптації). Вимоги до пам'яті обчислювальних пристроїв, за допомогою яких звичайно реалізуються ці алгоритми, приводять до бажаності їхнього подання в рекурентній формі. Із цього погляду аналіз різноманітних алгоритмів оцінювання здійснено [87]. Там же надане розв'язання варіанта завдання робастного оцінювання параметрів сигналу й мінімаксної фільтрації, а також розв'язаний ряд завдань адаптивної фільтрації.

У прикладних завданнях адаптивної фільтрації, ідентифікації й адаптивного керування лінійними об'єктами важливу роль відіграє метод стохастичної апроксимації.

Сучасний стан задач адаптивної фільтрації розглянуто в монографіях [86-89]. Використання формуючого фільтра для завад і сигналів у теорії Калмана-Б'юсі стало серйозним обмеженням для ряду додатків, у яких параметри сигналів та завад невідомі. Для відомих сигналів та завад часто можна припускати, що фільтр відомий з точністю до деякого кінцевого набору параметрів, які варто підібрати за заданими реалізаціями сигналу та завад. Таким чином, виникає завдання побудови фільтра з оптимальною структурою, у якому невідомі параметри моделі замінені їхніми оцінками, сформованими за допомогою тої або іншої процедури на основі заданих реалізацій сигналів. Якщо вдається так організувати процес оцінювання невідомих параметрів, що оцінки сходяться до оцінюваного параметра з імовірністю, рівною одиниці, то з часом фільтр із такими параметрами мало відрізняється від оптимального фільтра. Такий фільтр немовби "підстроюється" до заданих параметрів сигналів та завад, тому його називають адаптивним фільтром. Теорія адаптивної фільтрації набула поширення через важливість використання адаптивних фільтрів у багатьох додатках. Параметри сигналу або/і завади можуть повільно змінюватися в часі, і класичні методи фільтрації, засновані на припущенні незмінності параметрів сигналів, у цих випадках можуть виявитися неприйнятними.

В [31] адаптивний фільтр синтезується як фільтр з підстроюваними параметрами. Структура такого фільтра вибирається оптимальною за мінімумом дисперсії помилки, а настроювання параметрів здійснюється за допомогою стохастичних алгоритмів ідентифікації.

Монографія [89] містить загальні методи синтезу оптимальних фільтрів для випадкових процесів. Розглянуті методи засновані на статистичній обробці та накопичуванні інформації що не дозволяє реалізувати швидкодіючі фільтри, які працюють у режимі реального часу і можуть бути використані для КК РО.

Ефективним для прикладних задач побудови простих КК для різних технологічних процесів виявився новий метод синтезу структури адаптивного фільтра, який забезпечує реалізацію динамічної адаптації параметрів регуляторів у момент дії завад і не потребує накопичення інформації про завади [92, 93].

1.5.3. Оптимальне керування в контурах нижнього рівня ієрархії

Великий цикл робіт, ініційований у середині 60-х років, був присвячений лінійно-квадратичній теорії оптимального керування. Її спеціалізація різноманітні оптимізаційні завдання, що зводяться до мінімізації квадратичного функціонала на афінному просторі. Починаючи з 60-х років, і дотепер вона продовжує інтенсивно розвиватися, завоювавши репутацію одного з найбільш значимих із практичної точки зору розділів теорії оптимального керування [70].

Центральна ідея цього циклу робіт – частотна теорема [77], що є ефективним засобом розв'язання різноманітних лінійно-квадратичних завдань оптимізації.

В 90-х роках цей цикл робіт одержав продовження в дослідженнях, присвячених поширенню методів класичної теорії лінійно-квадратичної оптимізації на аналогічні завдання із квадратичними обмеженнями [94-97]. Точніше, мова йде про певний загальний підхід, що дозволяє стандартним чином будувати ефективні алгоритми розв'язання спеціальних завдань глобальної оптимізації на базі методів лінійно-квадратичної теорії оптимального керування. На відміну від більшості відомих методів неопуклої глобальної оптимізації, які в основній масі є обчислювальними, часто засновані на евристичних ідеях і не завжди супроводжуються гарантією збіжності, згадані алгоритми засновані на математичній теорії, є в найбільш істотній частині аналітичними й гарантовано приводять до знаходження глобального оптимуму. Вказаний метод був запропонований в [98].

Наприкінці 70-х років був розроблений оригінальний "абстрактний" підхід до побудови теорії оптимального керування. Його особливістю є розроблення загальної процедури, що дозволяє одноманітно й відносно просто одержувати необхідні умови оптимальності програмних керувань (як правило, у вигляді "деяких принципів максимуму", аналогічних принципу максимуму Понтрягіна) для широкого класу КК, описуваних самими різними рівняннями (диференціальними, інтегральними, у частинних похідних, із аргументом, що запізнюється, та ін.) при різних типах обмежень. Розвитку згаданого підходу присвячений великий цикл робіт. Певні підсумки цього розвитку підведені в монографії [96].

Одержав розвиток "абстрактний" підхід і для лінійно-квадратичного завдання оптимального керування [69, 98].

На початку й у середині 80- х років вирішено завдання синтезу оптимального регулятора при рівномірно обмежених збуреннях [97]. На початку 90-х років були досліджені поліноміальні методи синтезу оптимальних КК. Отримані різноманітні результати [99] (критерій керованості параболіноміальних матриць, алгебраїчний зв'язок рішень рівняння Лур'є-Ріккати загального вигляду).

У дисертації для оптимізації адаптивних КК використано критерій максимального ступеня стійкості [90].

1.5.4. Методи побудови адаптивних КК

Кардинальний спосіб вирішення невизначеності при синтезі систем керування полягає у використанні принципів адаптації.

Загальні підходи до побудови адаптивних систем керування розроблені в роботах [27, 29, 31-34, 69, 71, 90, 100].

Однак труднощі реалізації та погані динамічні властивості контура адаптації часто стають препоною на шляху синтеза адаптивних контурів керування. Тому розроблювачі конкретних адаптивних контурів керування шукають індивідуальні методи синтезу.

Синтез оптимального та адаптивного керування звичайно вимагає знання математичної моделі об'єкта та її параметрів. На практиці відсутній досить повний опис об'єкта керування й точне знання всіх необхідних

величин; більше того, у процесі функціонування характеристики об'єкта можуть змінюватися. Теорія адаптивних КК спрямована на реалізацію таких структур контурів, які автоматично реалізують ефективні закони керування за допомогою аналізу поведінки об'єкта при поточному керуванні. Природно, потрібний закон керування формується (можливо, приблизно) після деякого періоду "адаптації" або "самонавчання", що потребує накопичення даних [101]. Тому для побудови адаптивних КК, які працюють у режимі реального часу потрібна розробка нових методів.

В [102] наведені алгоритми адаптивного керування лінійними об'єктами, у яких зворотний зв'язок оптимізований стосовно квадратичного критерію якості керування. Алгоритми адаптації в цьому випадку засновані на різних методах математичної статистики (рекурентні процедури методу найменших квадратів, методи стохастичної апроксимації і т.д.), що дозволяють установити ефективність оцінок, одержуваних у режимі функціонування об'єкта керування. Така можливість звичайно реалізується при додаткових припущеннях про апріорні властивості завади, що діє на об'єкт керування (стаціонарність завади, стохастична незалежність збурюючих впливів). Припущення про подібні властивості завад можна опустити, якщо в каналі керування використовувати спеціальні тестові (пробні) сигнали; відповідний метод описаний в [104] і про довжує вдосконалюватися. Його використання дозволяє вирішувати різноманітні завдання оптимально-адаптивного керування при досить слабких припущеннях про властивості завад, які адитивно діють на об'єкт керування (наприклад, розв'язати мінімаксу задачу керування).

Своєрідний підхід до теорії адаптивного керування (метод швидкісного градієнта [102]) дав ряд цікавих результатів щодо адаптивної стабілізації [103]. Надалі метод швидкісного градієнта виявився потужним засобом розв'язання різноманітних завдань керування нелінійними системами. Останніми роками з його допомогою було вирішено багато задач керування нелінійними коливальними, у тому числі хаотичними процесами.

При використанні цього критерію можна одержати відносно прості вираження для адаптивних алгоритмів керування.

При побудові моделей багатьох динамічних КК для опису процесів у першому наближенні часто вибирається лінійне диференціальне або різницеве рівняння з постійними коефіцієнтами.

Явні рішення й чисельні алгоритми були отримані в основному для КК з матричними раціональними передатними функціями. Це пов'язано, зокрема, з великою популярністю методу рівнянь Лур'є-Ріккати. Для КК із запізнюванням вектор станів стає нескінченновимірним, а рівняння Лур'є-Ріккати з матричного перетворюється в операторне. Розв'язання останнього рівняння являє значні обчислювальні труднощі. Лише останніми роками з'являються алгоритми розрахунку регуляторів і фільтрів у найпростіших КК із запізнюванням [104].

Наприкінці 90-х років був розроблений новий метод синтезу оптимальних регуляторів, заснований на розв'язанні одного лінійного функціонального рівняння [105]. Він дозволяє безпосередньо обчислювати

параметри оптимальних і субоптимальних регуляторів без звертання до численних допоміжних процедур параметризації, матричних рівнянь і інших перетворень. Метод був розповсюджений на неперервні КК із запізнюванням по збурюванню [106]. Далі була доведена теорема подвійності завдань оптимального керування й фільтрації для КК в термінах вхід-вихід [107], при цьому розв'язання засновано на лінійних функціональних рівняннях. Сформульовано чисельний алгоритм розрахунку параметрів оптимального фільтра для КК зі скалярними входом і виходом. Наведені рішення у двох окремих випадках: для об'єктів першого й другого порядків.

Для розв'язання завдань побудови адаптивних КК може бути використаний метод настроювання параметрів регуляторів на основі критерію максимального ступеня стійкості [90], з розширенням його шляхом використання динамічної адаптації параметрів у реальному часі.

1.5.5. Динаміка імпульсних КК

Більшість КК для керування РО є імпульсними. Вони можуть описуватися диференціальними рівняннями з розривними нелінійними операторами. Сюди відносяться КК з широтним, частотним, амплітудним та іншими видами модуляції. Якщо нелінійний оператор замінити нелінійною функцією, що описує статичну характеристику імпульсного модулятора, то вийде система нелінійних звичайних диференціальних рівнянь, яку називають "еквівалентною" системою. Становить інтерес така гіпотеза: якщо стійка еквівалентна неперервна система, то при досить високій частоті дискретизації буде стійка й імпульсна система. Якщо мова йде про стійкість у цілому, то ця гіпотеза виявляється несправедливою. Еквівалентна система може бути стійкою в цілому в той час, як імпульсна система має періодичні рішення. Тому дослідження стійкості в цілому нелінійних імпульсних КК є змістовним завданням. Для його розв'язання в [108] був розроблений підхід, заснований на синтезі методу усереднення й методів теорії абсолютної стійкості неперервних нелінійних систем. На імпульсні КК були поширені круговий критерій і критерій В.М. Попова абсолютної стійкості неперервних нелінійних систем, частотний критерій, що враховує монотонність нелінійності, а також частотний критерій А.І. Баркіна, отриманий за допомогою функцій Ляпунова у вигляді форм четвертого порядку [106]. У всіх цих випадках отримані оцінки частоти дискретизації, при яких з використанням відповідної частотної умови абсолютної стійкості еквівалентного КК впливає стійкість у цілому стану рівноваги імпульсного КК.

В [109] отримана нижня оцінка для частоти дискретизації, при виконанні якої асимптотична стійкість стану рівноваги імпульсного КК впливає зі стійкості при першому наближенні еквівалентного неперервного нелінійного КК.

Різні аспекти побудови імпульсних КК розглянуто в роботі [75].

1.5.6. Якісна теорія гібридних КК

Починаючи з семидесятих років 20-го століття проводяться інтенсивні дослідження, присвячені розробленню теорії гібридних динамічних КК [27, 38,

39, 72]. Так називають КК, що поєднують взаємодіючі безперервну й дискретну частини. Звичайний стан таких КК описується змінними, які приймають значення з континуальної множини. З інженерної точки зору, гібридний КК це мережа, складена із взаємодіючих цифрових і аналогових пристроїв. Теорія гібридних динамічних КК розроблена на основі теорії керування й комп'ютерних наук: теорія керування застосовується для вивчення аналогових аспектів гібридної системи, у той час як методи комп'ютерних наук природні для вивчення її дискретних компонентів. Теорія гібридних КК є областю, актуальність і важливість якої постійно зростає.

Найбільш важливі приклади гібридних КК виникають там, де дискретний логічний пристрій взаємодіє з неперервним процесом. Така ситуація характерна для широкого класу систем і виробничих процесів, пов'язаних з корпоративними системами керування й обробки інформації.

Гібридні КК використовуються у випадках перемикання за певним алгоритмом набору базових регуляторів. У деяких випадках таке перемикання дозволяє істотно поліпшити якість керування в порівнянні з будь-яким окремо використовуваним регулятором. В інших випадках доступний лише обмежений набір типових регуляторів і завдання полягає в тім, щоб використовувати цей набір щонайкраще. Прикладом такої ситуації може служити задання оптимального керування швидкістю локомотива шляхом перемикання положень контролера машиніста або задання оптимального перемикання між режимами охолодження й нагрівання в системі регулювання температури дизеля локомотива.

1.6. Висновки. Цілі та задачі досліджень

Існуючі у теперішній час підходи до розроблення СК РТ спираються на дослідження, у яких модель РО розглядається як модель з зосередженими параметрами [110-118].

У той же час відомі дослідження наукової школи Лазаряна-Блохіна [76, 119-121], які дають змогу у системах СК РТ розглядати РО як об'єкт з розподіленими параметрами, що дозволить побудувати більш ефективні автоматизовані системи керування параметрами РО.

Проведений вище аналіз структури ієрархічних СК РТ, завдань енергозбереження, стану теорії і методів побудови складних систем і контурів керування РО дозволив виділити такі особливості й недоліки існуючих СК РТ:

- **складність, багатоконтурність і ієрархічність структур;**
- **хаотичність параметрів**, у тому числі випадкові значення багатьох величин, що характеризують процес перевезень;
- **нечіткі значення** параметрів, що характеризують процеси регулювання в контурах керування. До таких параметрів відносяться помилки регулювання і їхні похідні, властивості спеціальних РО - бігунів і відцепів на сортувальних станціях, моменти часу включення, перемикання й вимикання виконавчих механізмів РО;
- **істотна нелінійність** (наявність блоків множення й ділення у моделях підсистем СК РТ, обернено пропорційні залежності струму від напруги при

підтриманні заданої потужності енергоустановки та ін.) і **селективність характеристик** (вибір MIN-MAX значень характеристик) регульованих величин;

– **наявність інтенсивних завад і шумів (зі змінними характеристиками)**, а також збурень прямокутної форми, які не придушуються смуговими фільтрами мікропроцесорних колійних приймачів, впливаючи на контури керування. Завади та збурення знижують якість їх функціонування КК;

– оцінку імовірнісних характеристик сигналів, завад, процесів і характеристик РО можна отримати тільки на основі накопичення інформації та складної обробки ансамблів реалізацій спостережуваних і вимірюваних вхідних і вихідних сигналів, що **вимагає значних витрат часу** і не відповідає завданню реалізації процесів реального часу. При побудові перспективних КК для РО, пов'язаних із застосуванням адаптації, ці методи через **значні часові витрати** виявляються малоприматними;

– у значному числі випадків параметри РО характеризуються зміною у часі. Тому для розв'язання завдань адаптації в КК нижнього рівня СК РТ необхідне визначення поточних оцінок динамічних і статистичних характеристик РО та характеристик завад у процесі нормального функціонування РО. Потрібно, щоб ці оцінки можна було безпосередньо використовувати для поліпшення якості функціонування КК;

– застосування КК електроприводом локомотивів в умовах нестабільності параметрів РО для регулювання швидкості руху й гальмування РО вимагає використання методів **адаптації** з метою автоматизованого ведення графіку руху та забезпечення **безпеки** перевезень;

– при побудові підсистем диспетчерського керування рухом РО **відсутня концептуальна модель підсистем ситуаційного моделювання й керування**, яка ґрунтувалася б на інтеграції локальних і глобальних моделей виробничих ситуацій, які функціонують у реальному часі;

– **методи одержання поточних значень відношень оцінок випадкових сигналів до випадкових завад, моделі оптимізації параметрів настроювання пристроїв фільтрації і керування** на основі цих відношень, а також технологічні моделі автопідстроювання у реальному часі пристроїв фільтрації й керування РО на основі цих знань у літературі описані розрізнено, тільки стосовно електроприводів, а не РО в цілому як об'єкта керування. Систематичне дослідження таких моделей не проводилося;

– **якість процедур** автопідстроювання параметрів пристроїв фільтрації, керування і ступінь оптимальності параметрів настроювання КК РО на основі відношень оцінок сигналів до завад, придатних до побудови простих КК не оцінювались, порівняльний аналіз не проводився.

До останнього часу моделі РО не враховують реальний розподілений характер їх параметрів. У відомих роботах РО розглядаються тільки як динамічна ланка з зосередженими та незмінними параметрами, що не відповідає реальним умовам їх функціонування.

Мета та задачі досліджень. Метою дисертації є розроблення перспективної концепції синтезу автоматизованих систем керування рухомими одиницями рейкового транспорту залізниць для автоматизованого ведення графіків руху. Досягнення цієї мети передбачає постановку та вирішення на основі системного підходу таких основних задач:

- проаналізувати тенденції розвитку систем керування засобами рейкового транспорту;

- виконати аналіз існуючих методів синтезу контурів керування рухомими одиницями;

- створити концептуальний підхід, що удосконалює побудову багаторівневої СК РТ, при цьому обґрунтувати критерії оптимізації середнього та нижнього рівнів системи, які забезпечують впевненість у правильності вироблення керуючих дій у реальному часі;

- розробити комплекс логіко-динамічних моделей диспетчерських підсистем керування рухомими одиницями з врахуванням нечітких ситуацій на основі графових структур, які в найбільшій мірі відповідають географічній структурі залізниць;

- розробити базу даних, необхідних для функціонування диспетчерських засобів підсистем керування рухом засобів транспорту з метою формування та виведення керуючих впливів, які забезпечать оптимальні параметри руху та раціональне взаєморозміщення РО на різних маршрутах;

- розробити метод синтезу контурів керування РО на основі використання у таких контурах адаптивних фільтрів та регуляторів, які враховують реальний характер зміни сигналів та параметрів РО;

- розробити універсальну модель контура керування рухомими одиницями, яка враховує розподілений характер рухомої одиниці як об'єкта керування, завади, які накладаються на сигнали, та використовує методи динамічної адаптації для вибору параметрів настроювання фільтрів та регуляторів;

- виконати дослідження та моделювання адаптивних контурів керування з метою оптимізації їх параметрів та формування даних для реалізації керуючих контролерів.

Зазначені завдання досліджень дисертації показані на рис. 1.5, де наведені основні технологічні процедури, які повинні бути реалізовані в ієрархічній СК РТ. Ці процедури повинні бути реалізовані на основі використання останніх досягнень системології та теорії систем керування, та забезпечувати побудову простих адаптивних КК, які ефективно функціонують у реальному часі, що буде сприяти удосконаленню експлуатації рейкових транспортних засобів залізниць.

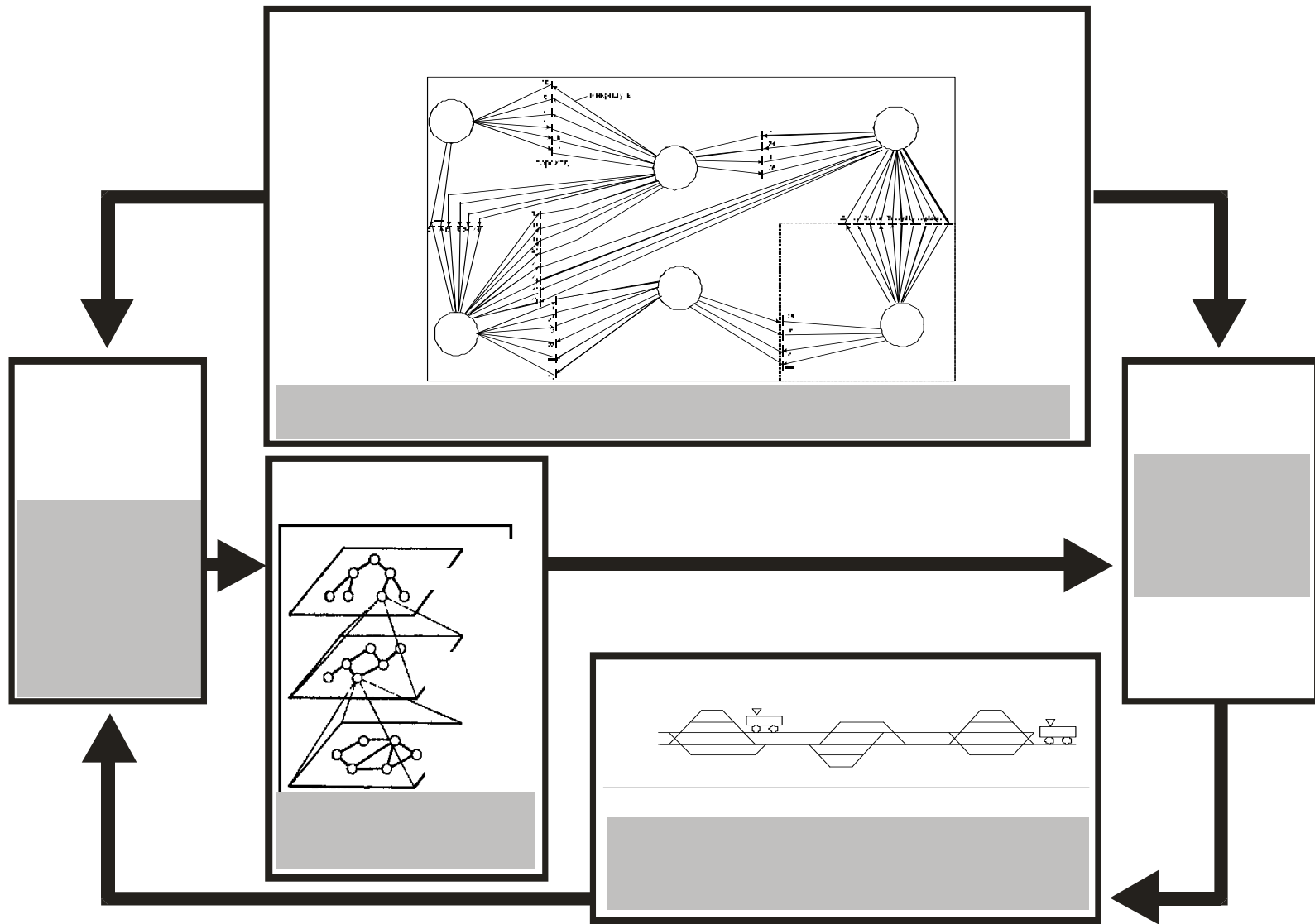


Рис. 1.5. Узагальнені процедури керування рейковими засобами залізниць і завдання досліджень дисертації

РОЗДІЛ 2

КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ПОБУДОВИ ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЗАСОБАМИ РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ

Створення перспективних СК РТ направлено на удосконалення експлуатації засобів рейкового транспорту, воно повинно ґрунтуватися на ієрархічному принципі побудови їх структури, теорії складних систем, теорії керування та на сучасних інформаційних технологіях, тобто на системному підході [123-132].

Враховуючи необхідність підвищення у перспективі швидкості РО, а також складність, нелінійність, нестаціонарність, багатофункціональність СК РТ, невизначеність інформації, необхідно будувати такі системи на основі методів адаптації.

2.1. Проблеми інтелектуалізації СК РТ

Існуючі системи керування функціонують на основі використання правил формування керуючих дій за допомогою аналізу, який був виконаний попередньо. При такому підході існує мало можливостей для модифікації та перегляду час від часу керуючих дій, які сформовані в результаті попередніх процедур.

Збурення, які мають місце у нестабільних умовах перевезень, при існуючих підходах до створення систем не можуть бути враховані і компенсовані, тому що прийняту логіку функціонування систем неможливо реконфігурувати.

Тому потрібна нова концепція побудови СК РТ, яка дозволяє адаптувати стратегію керування до хаотичної поведінки об'єкта-РО.

Визначимо стан систем як компактне подання минулих дій системи, яке при заданих визначених входах системи дозволяє передбачити, якими будуть виходи систем і як зміниться їх стан.

Задача проектування СК РТ полягає у формуванні таких процедур, під впливом яких система повинна змінювати свій стан у послідовні моменти часу для досягнення заданого критерію оптимізації.

В основу створення концепції побудови СК РТ покладемо чотири складові умови:

- повинна існувати множина точок часу, в яких виконується формування керуючих дій;
- в кожний із таких моментів часу необхідно мати множину керуючих впливів (сукупність альтернативних впливів), з якої можна робити вибір;
- необхідна сукупність технологічних моделей, які дозволяють прогнозувати майбутню поведінку системи під впливом кожного вибраного керуючого впливу;

- повинні бути сформовані критерії оптимізації, на основі яких формується поведінка системи.

Розв'язання багатьох задач, що описують функціонування СК РТ, часто є ускладненим, бо такі задачі мають велику розмірність.

Тому часто використовують розкладання (декомпозицію) вихідної (первинної) системи на підсистеми, для кожної з яких необхідно розв'язувати задачу меншої розмірності. Загальне рішення, як правило, одержують в результаті ізолюваного аналізу таких підсистем. Широко відомий метод, запропонований М. Месаровичем [47], коли виділяються підсистеми першого (нижнього) та другого (середнього) рівнів. Врахування зв'язків, чітке виявлення яких є обов'язковим, може виконуватися у різних формах. Останні в основному визначаються характером вихідної задачі та методом виділення підсистем першого та другого рівнів. Основна задача другого рівня полягає у координації функціонування підсистем першого рівня з метою отримання загального рішення поставленої задачі.

Характер взаємодії, показаний на рис.1.1, є типовим для великих підприємств, до яких можна віднести і рейкові транспортні засоби залізниць. Як бачимо, структура має пірамідальний (ієрархічний) характер.

При побудові складних систем треба враховувати такі їх особливості:

- у загальному вигляді об'єкт керування містить багато пов'язаних складових;
- чисельні значення параметрів об'єкта вимірюються з похибками, закони розподілу яких невідомі;
- критерії якості можливо визначати для окремих рівнів системи.

Перспективні СК РТ, наприклад для магістрального залізничного транспорту, можуть бути подані у вигляді багаторівневої ієрархічної структури (рис. 2.1).

Нижній рівень служить для безпосереднього керування РО. Він повинен містити контури цифрового керування трамваями, електропоїздами, електровозами, локомотивами й т.д. Інформація для цих контурів керування формується зовнішнім середовищем. Це:

- пасажирські, грузові та сортувальні станції і перегони, що входять у полігони залізниць ;
- термінали автомобільного, річкового, морського транспорту, сполучені із залізничним транспортом.

На нижньому рівні формуються керуючі впливи U_1 на РО.

Середній рівень, іноді називаний SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), здійснює збір даних і диспетчерське керування РО на полігонах залізниць (поїзди).

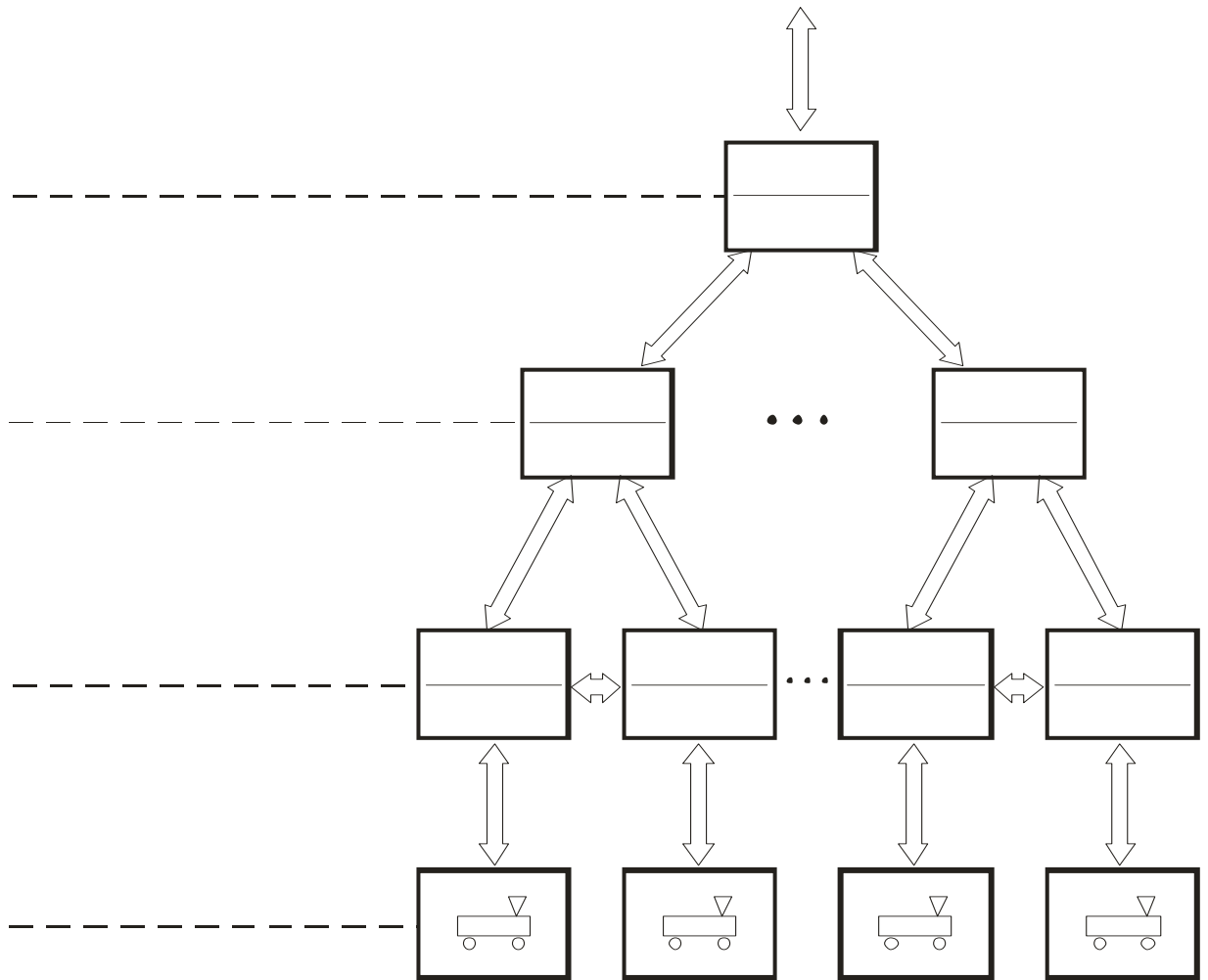


Рис. 2.1. Структура багаторівневої СК РТ:
(G_1, G_2, G_3 – відповідно критерії оптимізації рівнів системи;
– відповідно вихідні впливи рівнів системи)

На середньому рівні диспетчерським персоналом аналізується ситуація перевезень на полігонах і формуються відповідні керуючі дії. Із цією метою використовуються різні системи візуалізацій (пульти-табло, комп'ютерні й інші дисплеї). У результаті аналізу ситуацій на станціях і перегонах за допомогою АРМів формуються рекомендації про керування РО, необхідні для раціональної організації процесу перевезень (ПП). Крім того, цей рівень повинен формувати завдання y_2 у контури керування нижнього рівня.

Верхній рівень (Manufacturing Execution System) являє собою підсистему організації керування перевезеннями в рамках Укрзалізниці. Тут виконується впорядкована обробка інформації про хід ПП на всіх полігонах залізниць та забезпечується реалізація організаційно-економічного керування якістю перевезень і безпекою. Підсистеми цього рівня видають управлінську інформацію N_3 на середній рівень ієрархії. Зовнішнім середовищем для верхнього рівня є Міністерство транспорту, підприємства інших галузей промисловості, на яких є підсистеми, що здійснюють, наприклад, планування ресурсів.

У перспективі, коли ПП буде ускладнюватися (міжнародні транспортні коридори, зростання швидкості руху, надзвичайні ситуації, нечіткість інформації), потрібна реалізація заходів щодо підвищення оперативності формування керуючих впливів диспетчерами та удосконалення експлуатації засобів транспорту - РО. У зв'язку із цим виникає проблема забезпечення диспетчерів додатковою інформацією про можливі варіанти прийняття рішень. Для цього **потрібне створення відповідних технологічних моделей**, що забезпечують перегляд і прогнозування різних ситуацій для прийняття ефективних рішень з керування. При цьому найважливішим завданням є **оперативність моделювання в реальному масштабі часу**, протягом якого можуть бути вироблені завдання в контури керування нижнього рівня. Час виконання оперативного моделювання обмежується динамікою цих контурів.

Кожний з виділених рівнів може бути проаналізований у відповідності до своїх часткових критеріїв. Відомо, що у випадку, коли окремі підсистеми функціонують відносно незалежно, оптимізація за частковими критеріями на основі використання методів декомпозиції [47, 65, 133, 134] забезпечує оптимальне функціонування всієї системи в цілому.

У загальному випадку процедура поділу (декомпозиції) складної системи базується на її структурно-графічному поданні [133].

Визначення підсистеми у більшості випадків здійснюється на основі фізичних міркувань. У СК РТ історично склалася ієрархія побудови структури, показана на рис. 2.1. Окремі підсистеми відповідають схемі рис.2.2, б.

Нижче будуть розглядатися два рівні ієрархії середній і нижній, що забезпечують безпосереднє керування РО на полігонах залізниць (рис. 2.2, а).

Ми апріорі припускаємо, що досліджувана складна СК РТ уже розділена на окремі підсистеми, кожна з яких відповідає структурі рис. 2.2.

У загальному випадку складність не є невід'ємною властивістю ПП. Складність є наслідком способів, за допомогою яких ми будуємо СК РТ. Інакше кажучи, складні не об'єкти, а системи, за допомогою яких управляється

об'єкт.

В [135] запропоновано оцінювати ступінь складності кількістю інформації, необхідної для опису реальної системи.

При описі складних систем найбільш важливим є створення простих адекватних моделей систем. Як відзначено в [134], "своєму збереженню й процвітанню в цьому світі, який може бути й простим, і складним, людство зобов'язане не потужності й швидкості обчислень, а тому, що системи, які його цікавлять, являють собою досить окремі випадки, які піддаються аналізу відносно простими засобами, що дозволяють визначати їхню глибинну структуру".

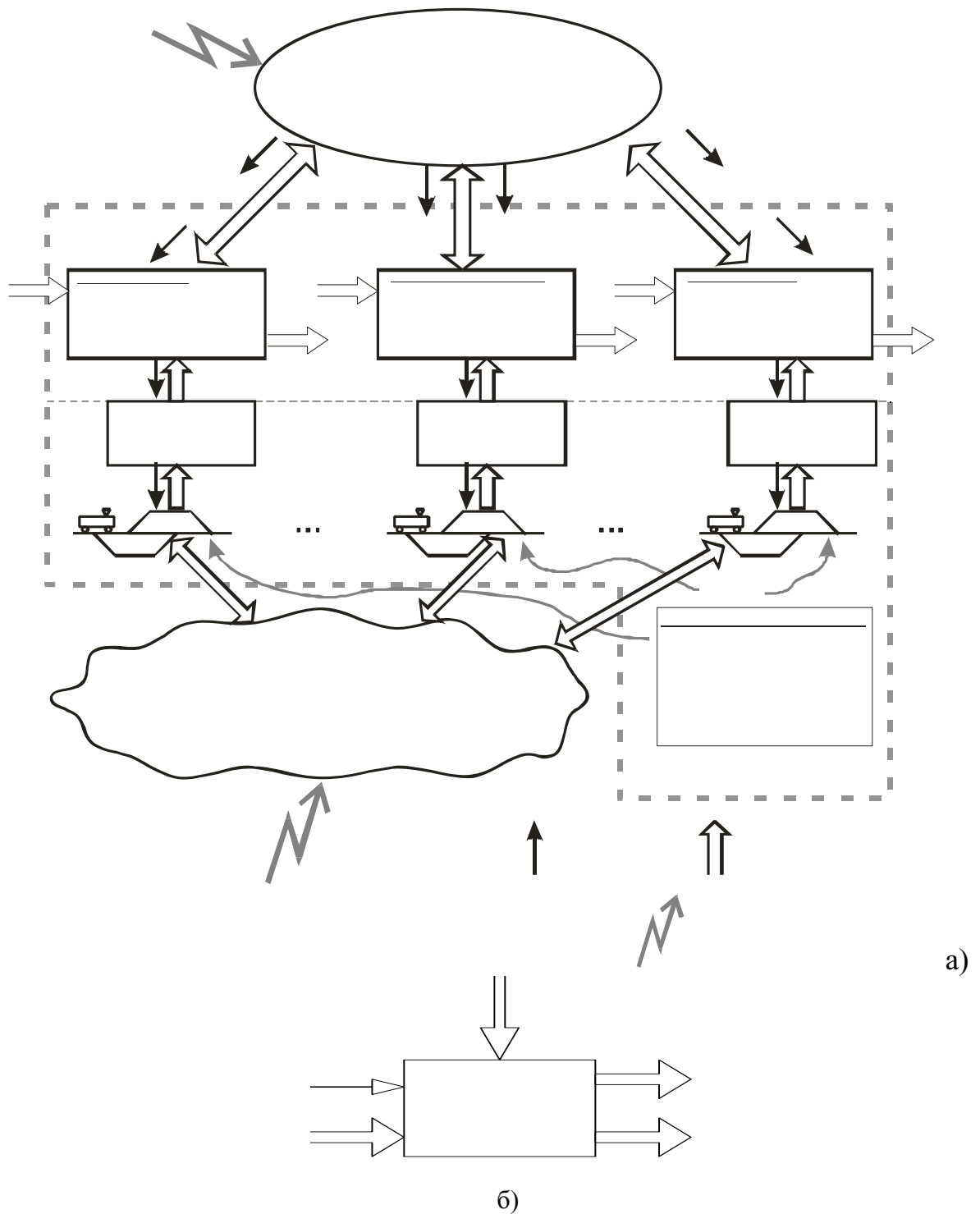


Рис. 2.2. Дворівнева структура системи керування рейковим транспортом :
 а) загальна структура системи; б) сигнали, які характеризують i -ту підсистему середнього рівня ієрархії; N_i - вхідні сигнали; x_i - проміжні вхідні сигнали від інших підсистем; M_i - сигнали керування i -тою підсистемою; z_i - вихідні сигнали, які надходять на входи інших підсистем; y_i – завдання у контури нижнього рівня

Таким чином, потрібна реалізація стратегії пошуку нової структури, заснованої на методах індукції плюс конкретний аналіз і евристичні методи розв'язання завдань, а не прямолінійний аналіз дуже "загальних класів сильно зв'язаних складних систем".

В [30] запропоновано визначити науку про системи як науку про спрощення. Таким чином, складність і її протилежність - простота є поняттями, пов'язаними з багатьма фундаментальними філософськими, математичними й обчислювальними проблемами.

Проблеми реалізації складних систем можуть бути вирішені за допомогою сучасної теорії керування, при цьому отримане рішення повинно бути в остаточному підсумку спрощено настільки, щоб людина, яка приймає рішення, могла скористатися цим рішенням. У загальному випадку для зменшення складності повинна мінімізуватися втрата потрібної інформації.

2.1.1. Міри складності СК РТ

При розв'язанні завдань аналізу СК РТ складність розуміється подвійно. По-перше, вона є властивістю організації системи, а по-друге, вона є характеристикою системних завдань. Тому можна виділити дві градації складності:

- складність систем;
- складність завдань, яку іноді називають обчислювальною складністю.

Виділяють два загальних принципи оцінки складності систем.

Відповідно до першого принципу, складність системи повинна бути пропорційна обсягу інформації, яка може бути використана для опису системи

У відповідності до другого принципу, складність системи повинна бути пропорційна загальному обсягу інформації, в тому числі нечіткої, що обробляє система.

Складність систем вивчається насамперед для створення методів, за допомогою яких вона може бути знижена до прийняттого рівня. Спрощуючи систему, прагнуть створити моделі, що адекватно описують систему. При цьому необхідно вказувати міру складності.

Таким чином, необхідно *створювати спрощені моделі*, що адекватно відображують процеси в реальних системах.

Далі проаналізуємо основні особливості середнього рівня ієрархії СК РТ. Цей рівень відіграє важливу роль у формуванні завдань у контури керування нижнього рівня.

2.1.2. Аналіз середнього рівня ієрархії СК РТ

Середній рівень СК РТ можна розглядати як дискретно-подійний, на якому рішення щодо керування РО приймаються в залежності від подій, : завантаженість напрямків перевезень за допомогою РО, наявність додаткових РО, необхідність формування-розформування поїздів та ін.

Моделі підсистем керування доцільно формувати на основі графових структур, бо вони наочно відображають географічний характер рейкової транспортної топології (полігони залізниць, залізничні вузли, пасажирські,

товарні, сортувальні станції).

При цьому для удосконалення моделей потрібні раціональні графові структури, які б відрізнялися скороченою кількістю елементів (наприклад, вершин, переходів, ребер). У наступних розділах дисертації розроблено нові графові структури для моделей, підсистем СК РТ, в яких *вперше введені розширення: квазідвонаправленість ребер, багатofункціональність переходів та ін.*, що значно спрощує моделі.

За рахунок спрощення моделей з'являється можливість скорочення терміну моделювання різних ситуацій при керуванні РО, що дає змогу більш оперативно формувати керуючі дії та прогнозувати ситуації.

Основна задача середнього рівня – оперативне формування задаючих впливів на контури керування РО.

У теперішній час на залізницях України на середньому рівні СК РТ використовуються морально застарілі підсистеми диспетчерської централізації, наприклад, мікропроцесорна диспетчерська централізація “Каскад”[126]. На залізницях Росії, крім систем диспетчерської централізації, використовується автоматизована система ведення та аналізу графіку виконаного руху (ГИД УРАЛ – ВНИИЖТ)[127].

Вказані підсистеми побудовані на технологічних засадах керування засобами рейкового транспорту, які склалися у колишньому СРСР у 80-х роках 20-го сторіччя, й понині використовуються у державах СНД. Вказані підсистеми відрізняються від диспетчерських підсистем розвинених країн тим, що спрямовані на реалізацію швидкостей руху РО, які є найнижчими у Європі і не відповідають швидкостям РО США, Японії, Китаю.

Відомості про технічні характеристики систем диспетчерського керування розвинених країн, у яких використовуються високі швидкості руху (180 – 350 км/год) у літературі відсутні або носять тільки рекламний характер[227], мабуть тому, що такі системи разом із новітніми інформаційними технологіями та технологіями автоматизованого керування засобами рейкового транспорту являють стратегічний ресурс держав і мають вартість яка є не підйомною для України.

Ці підсистеми вирішують такі завдання оперативно-диспетчерського керування:

- збирання і обробка інформації про стан полігонів залізниць та розміщення РО;
- ведення графіку руху поїздів;
- координація роботи окремих диспетчерських кіл і полігонів залізниць;
- документування даних і дій оперативно-диспетчерського персоналу.

Основними недоліками існуючих диспетчерських підсистем є:

- функціонування в інформаційному режимі з окремими елементами поради;
- відсутність інтеграції з контурами керування нижнього рівня ієрархії;
- не вирішуються завдання прогнозування розвитку ситуацій;
- значна залежність ефективності керування від суб'єктивних якостей диспетчерів.

Таким чином, актуальним є створення більш досконалих диспетчерських підсистем. Однією з головних функцій таких підсистем повинна бути процедура формування керуючих дій. Автоматизація такої процедури підвищить ефективність керування РО і значною мірою усуне суб'єктивний фактор. Це особливо актуально у зв'язку із необхідністю підтримання раціональної швидкості руху РО при її зростанні у майбутньому та з відсутністю ряду найважливіших засобів автоматичного контролю (наприклад, маса поїзду, електронний номер РО, достовірні та оперативні інформація про дислокацію РО), що потребує формування керуючих дій у умовах невизначеності. Слід відзначити, що перспективні автоматизовані системи керування СКРТ повинні виконувати автоматизоване ведення графіку руху і на відміну від існуючих систем, які тільки задають обмеження швидкості на основі даних підсистем автоблокування, надавати рекомендації щодо раціональної швидкості РО. Отже для ефективного керування швидкістю РО перспективні підсистеми середнього рівня СКРТ повинні мати розвинену базу даних, частина якої про дубльована у бортовому комп'ютері РО (контурі керування). Така база даних мусить включати:

- цифрову карту мережі залізниць;
- цифровий опис планів станцій;
- цифрові дані про верхню будову рейкового шляху;
- супутникову дислокацію рухомих одиниць (приблизно);
- дислокацію, яка визначається за електронними пікетами (точна);
- швидкість, яка рекомендується диспетчерськими підсистемами на основі розподілу рухомих одиниць в результаті стеження за перевезеннями;
- рекомендовані графіки руху поїздів;
- масу (вагу) поїздів, яка визначається масовимірювачами рухомих об'єктів

Розрахунки, які враховують наявність вказаної бази даних, дозволяють прогнозувати такі переваги перспективних СКРТ.

- на основі використання підвищеної швидкості РО скоротиться парк вагонів та локомотивів;

- буде підвищена стабільність графіку руху, наприклад пасажирських перевезень з 92 до 95 %;

- за рахунок підвищення стабільності підтримання графіку руху зменшиться кількість непередбачуваних зупинок, нераціональних затримок поїздів всіх категорій на дільницях залізниць;

- при збільшенні дільничної швидкості поїздів на 10 %, наприклад на напрямку Купянськ – Одеса, може бути скорочено парк локомотивів та вагонів на 3 – 4 % від існуючого на напрямку загального парку вагонів та локомотивів.

Таким чином підтримання раціональної швидкості РО є параметром, який є основою автоматизованого ведення графіку руху, що буде сприяти удосконаленню експлуатації засобів рейкового транспорту.

Сказане може бути реалізовано при впровадженні у перспективі необхідних засобів автоматизації, методів нечіткого формування керуючих дій, нових методів адаптивного керування.

Тому *важливе значення має створення моделей, які функціонують у режимі реального або прискореного часу*, що повинно забезпечити оперативність прогнозування ситуацій.

2.2. Розроблення вимог до моделей СК РТ

Виходячи із дворівневої структури СК РТ нижче розробляються вимоги до моделей підсистем середнього та контурів керування нижнього рівнів.

Як показано у п. 1.1, СК РТ є складним об'єктом для теоретичного аналізу, що стримує їх удосконалення.

Сучасна теорія керування дозволяє вирішувати проблеми оцінки та прогнозування стану СК РТ шляхом створення та використання адекватних моделей. Ця проблема не є тривіальною, бо СК РТ характеризується такими особливостями:

- об'єкт – ПП являє собою складну систему, стан якої характеризується великою кількістю параметрів, деякі з яких не контролюються;
- ці параметри статистично пов'язані між собою;
- чисельні значення параметрів вимірюються із похибками, закони розподілення яких часто невідомі.

Для побудови моделей СК РТ необхідно оцінювати велику кількість статистичних даних, які або відсутні, або їх важко отримати. Додаткові проблеми виникають у зв'язку з тим, що закони розподілу похибок даних, як правило, невідомі. Це призводить до необхідності використання нечіткого опису інформації, що характеризує ПП.

Найбільш перспективними є графові моделі підсистем середнього рівня СК РТ побудовані на основі мереж Петрі [65, 136-138]. Мережі Петрі зручні, так як можуть бути прив'язані до географії системи, крім того, для їх опису можна використати алгебраїчну форму.

Практикою побудови систем для автоматизації процесу формування керуючих дій встановлено [138], що процес реалізації процедури висловлювання рішень щодо керуючих дій включає такі складові: вивчення предметної галузі; оцінку ситуацій; розроблення процедури; розроблення комплексу моделей.

Класифікацію моделей можна виконати на основі різних математичних методів [8,9,12,47,123,126], до яких відносяться варіаційне обчислення, комбінаторна та дискретна оптимізація, теорія статистичних рішень, теорія графів. При прийнятті рішень часто доцільно виконувати оптимізацію задач на графах на всіх етапах прийняття рішень (при постановці задачі, при побудові моделі, при її оптимізації, при експертних оцінках отриманих рішень).

Тому *оперативність прийняття рішень* є основним показником оптимізаційних задач на графах і потребує організації обчислень у реальному масштабі часу.

2.2.1. Інтегрування та інтелектуалізація* процесів керування на середньому рівні СК РТ

Сучасний стан керування засобами рейкового транспорту потребує нового підходу до автоматизованого керування РО. При цьому необхідна інтеграція процесів *моделювання, прийняття рішень та керування* у складному хаотичному інформаційному середовищі. Такі інтегровані комп'ютеризовані системи дозволяють більш оперативно та чітко приймати рішення щодо керування РО.

Основними напрямками інтеграції є:

інтеграція баз даних та знань, а також створення баз даних з розподіленою обробкою інформації;

технічна інтеграція та створення локальних інформаційно-керуючих мереж;

математична, процедурна (алгоритмічна) та програмна інтеграція щодо рівнів ієрархії системи.

Шляхами удосконалення експлуатації та керування засобами рейкового транспорту є:

інтелектуалізація організаційно-диспетчерського управління;

побудова адаптивних контурів керування РО з адаптацією процесів фільтрації та настроювання параметрів регуляторів у динаміці.

На рис. 2.3 показано сукупність моделей, які потрібно формувати на середньому рівні СК РТ.

Значний обсяг інформації, яка формується у зовнішньому відносно РО середовищі, вимагає її формалізації.

Ступінь формалізації інформації може бути заданий таким чином

(2.1)

У загальному випадку швидкість РО можна змінювати за виразом
 $y = b_1 y' + b_2 y''$,

де y' – деяка детермінована швидкість,

y'' – коректуючий вплив на швидкість,

b_1, b_2 – відповідно вагові коефіцієнти, які задаються при реалізації моделей підсистем середнього та нижнього рівнів.

Враховуючи різні варіанти характеристик наявної інформації (2.1), необхідно формувати різні моделі. Так, на рис. 2.3 наведено підходи до побудови моделей, які повинні реалізовувати різні види керування:

керування на основі нечіткої ($\delta = 1$);

класичне керування ($\delta = 0$);

керування з адаптацією ($\delta = 1$).

Зв'язок моделей з підсистемами керування наведено на рис. 2.4.

При побудові сучасних систем набула поширення математична логіка, яка включає в себе обчислення висловлювань, обчислення предикатів та ін.

При цьому використовують дедуктивні методи, які задають множини шляхом вибору вихідних елементів (аксіом).

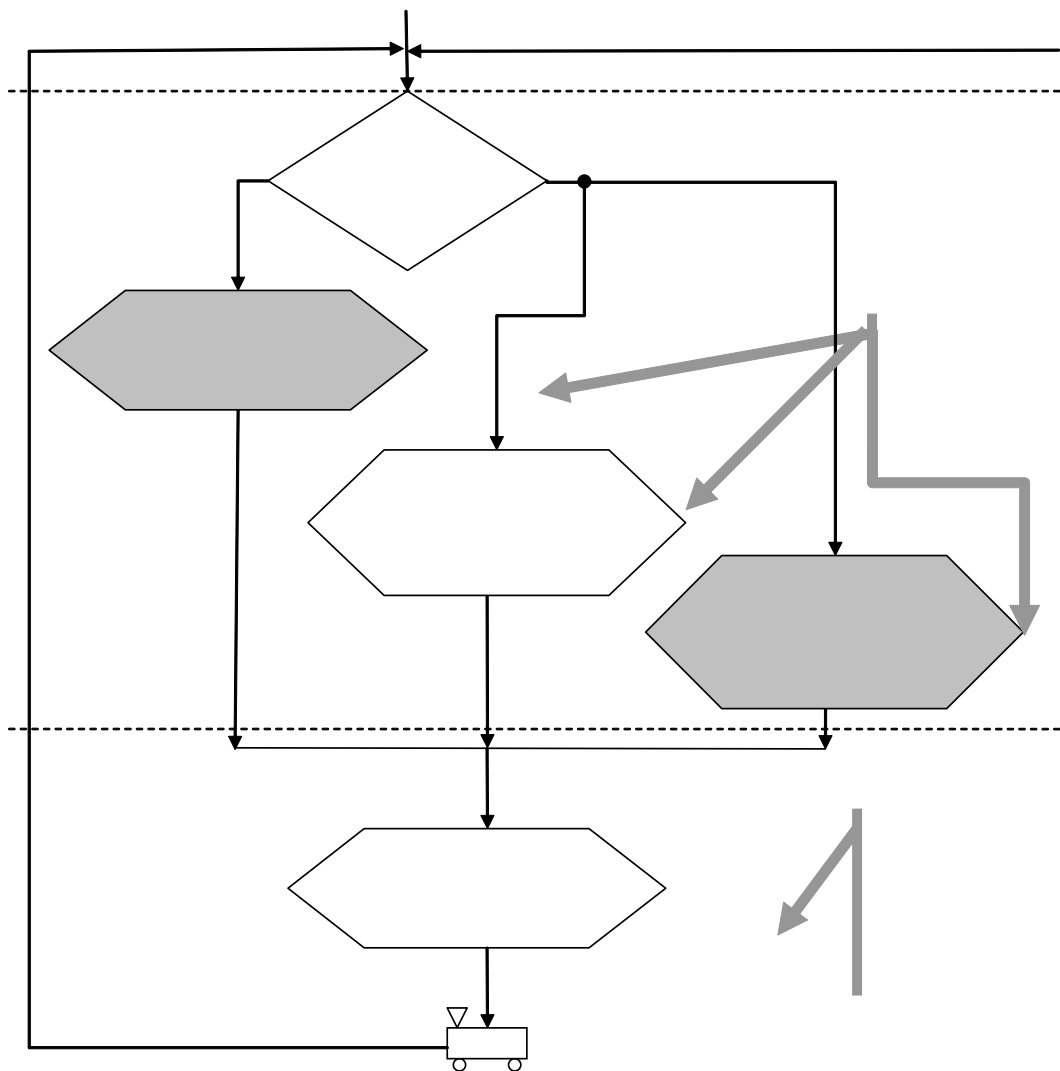


Рис. 2.3. Сукупність моделей середнього рівня СК РТ

Відомо, що широкий клас задач моделювання зводиться до використання графів [139]. Багато задач синтезу моделей пов'язано з вирішенням питань оптимального розфарбування графів та визначення незалежних максимальних множин [140, 141].

Значне розповсюдження серед графових моделей набули моделі на основі розширених мереж Петрі [142], причому розширення, які розробляються для різних випадків, надають моделям нові функціональні можливості.

Рис. 2.4. Зв'язок моделей з підсистемами керування

2.2.2. Контури керування нижнього рівня з моделями РО з розподіленими параметрами

До теперішнього часу складні СК РТ розроблялися за окремими рівнями. При цьому основну увагу приділяли середньому організаційно-інформаційному рівню (диспетчерському), який розглядався відокремлено від нижнього рівня, що включає в себе КК окремими РО.

Як показано у п. 1.4, отримати значну економію енергоресурсів можливо, вдосконалюючи контури керування РО, які функціонують в умовах, коли сигнали що в них використовуються, спостерігаються у суміші з завадами, а параметри РО змінюються у часі.

До останнього часу моделі РО розглядалися як динамічні ланки з зосередженими параметрами, що є дуже грубим наближенням до реальних ситуацій [111-116]. При такому підході враховувалися тільки динамічні властивості електричної передачі (електропривода) РО.

У загальному випадку складна РО являє собою тяговий агрегат (локомотив, електровоз), який забезпечує тягове зусилля для переміщення ланцюга вагонів, зчеплених між собою та з локомотивом. Вагони мають гнучкі зв'язки між собою, а загальна маса поїзда розподілена вздовж поїзда. Під час руху поїзда тягова одиниця формує зусилля, яке передається через ланцюг вагонів від першого вагона до останнього. При цьому координата прикладання тягового зусилля передається протягом певного періоду часу по довжині поїзда (цей період часу визначається масою поїзда та іншими зовнішніми факторами). Таким чином, має місце розподілене запізнювання, яке суттєво впливає на передачу тягового зусилля. Враховуючи значну інерційність поїзда, наявність розподіленого запізнювання призводить до виникнення загасаючої хвильової передачі тягового зусилля вздовж поїзда [76, 119-122].

РО у загальному випадку являє собою об'єкт з розподіленими параметрами, модель якої розроблено у розділі 7.

При дослідженні динаміки контурів керування РО традиційно використовувалась модель РО як передатна функція у вигляді аперіодичної ланки 2-го порядку [116]:

$$, \quad (2.5)$$

де T_1 , T_2 – сталі часу електричної передачі локомотива, які характеризують генератор та тягові двигуни відповідно, K_0 - коефіцієнт передачі.

Така передатна функція відображує тільки динаміку електричної передачі тягової одиниці, враховуючи поїзд як зосереджену масу. При цьому не враховуються витрати енергії на формування згасаючої хвилі передачі механічного зусилля на вагони, що відтворює розподілений характер маси вздовж поїзда.

У деяких випадках (наприклад, при невеликій довжині рухомої одиниці – окремий локомотив) РО можна розглядати як динамічну ланку із зосередженим запізнюванням.

КК нижнього рівня на основі інформації від середнього рівня СК РТ повинні забезпечувати підтримання заданої швидкості РО.

Стандартний контур керування РО має вигляд, показаний на рис. 2.5,а. Для компенсації завад у сигналах КК в дисертації запропоновано введення адаптивного фільтра (рис. 2.5,б).

Враховуючи характеристики РО як складної електромеханічної системи із розподіленими параметрами [76, 121], у ролі моделі об'єкта у дисертації використано приведену передатну функцію, яка складається з передатних функцій РО та фільтра

$$G(s) = \frac{K}{s(T_1s + 1)(T_2s + 1)} e^{-sT_d} \quad (2.7)$$

де K - еквівалентне стале запізнювання; T_1 - коефіцієнт передачі; T_2 - стала часу об'єкта; T_d - стала часу фільтра.

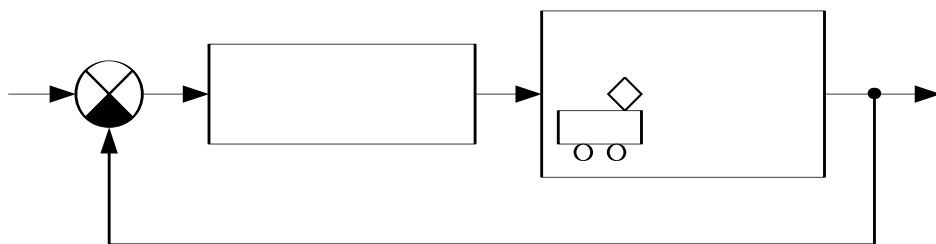
Моделі РО, які використовуються при побудові КК, наведено у табл. 2.1. **Тоновані моделі 2 і 3 запропоновані вперше.**

2.3. Обґрунтування критеріїв оптимізації

Виходячи із запропонованої на рис. 2.2 дворівневої ієрархічної структури, необхідно обґрунтувати критерії оптимізації для середнього організаційно-диспетчерського рівня та контурів керування РО на нижньому рівні.

У загальному вигляді розробити критерій оптимізації ієрархічної СК РТ досить складно, бо такий критерій повинен врахувати різні за своєю природою складові [142].

а)



б)

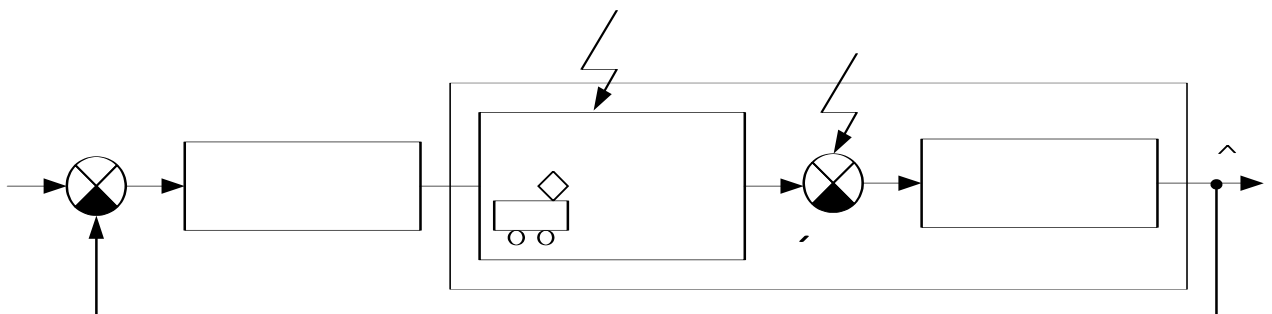


Рис. 2.5. Узагальнена структура контура керування РО:
а) без врахування завад, б) з врахуванням завад

№№ пп	Модель рухомої одиниці	Характеристика моделі	Вид контуру керування	Критерій настроювання параметрів контуру керування
1	Традиційна модель у вигляді передатної функції 2-го порядку	Враховує тільки динаміку тягового електропривода	Класичний контур стабілізації без адаптації	Інтегральні критерії якості
2	Нова модель, до якої входять ланки із сталим запізнюванням та аперіодична ланка фільтра (для малої довжини РО)	Враховується динаміка РО як об'єкта зі сталим запізнюванням. Аперіодична ланка із підстроюваною шляхом адаптації сталою часу використовується для заглушення завад	Контур стабілізації з адаптивними фільтром і адаптивним регулятором, які настроюються шляхом динамічної адаптації	Критерій максимального ступеня стійкості
3	Нова модель, до якої входять ланки із загасанням та аперіодична ланка фільтра (для великої довжини РО)	Враховується динаміка РО як об'єкта з розподіленими параметрами. Аперіодична ланка з змінюваною сталою часу використовується для заглушення завад	Контур стабілізації з адаптивними фільтром і адаптивним регулятором, які настроюються шляхом динамічної адаптації	Критерій максимального ступеня стійкості

Таблиця 2.1.

Моделі рухомих одиниць

До таких складових на середньому рівні будемо відносити:

- оперативність прийняття рішень щодо формування завдань у контури керування нижнього рівня;
- впевненість у об'єктивності прийняття рішень щодо впливу на контури нижнього рівня;
- складність моделей функціонування.

Для нижнього рівня при настроюванні КК виберемо критерій максимального ступеня стійкості.

2.3.1. Загальні положення

Сучасна теорія вибору та прийняття рішень спирається на два підходи – кількісний та якісний. Кількісний підхід приписує кожному рішення, що приймається, кількісну оцінку – число – значення деякого векторного, у загальному вигляді, функціонала. Але цей підхід не охоплює багатьох ситуацій. Більші можливості має якісний підхід до оцінки рішення. Останнім часом все більшого застосування набуває підхід до вибору та прийняття рішень на основі моделей, які найбільш адекватні багатьом складним процесам

У задачах прийняття рішень, до яких відноситься процес прийняття рішень з керування у диспетчерських системах, критерій якості у загальному вигляді такий

при обмеженнях

де x - n – мірний вектор стану; u - r – мірний вектор керування РО на основі прийняття рішень; a - l – мірний вектор параметрів РО, який підлягає оцінюванню; w – стохастичні збурюючі впливи, d – невизначені параметри, для яких задаються, наприклад, області (). Вище X , U , A – деякі задані дозволені області для x , u , a ; R – відповідний евклідовий простір. У загальному випадку F є вектором, тобто , де - звичайні часткові критерії , або відповідні функції належності цілей, обмежень та їх композицій, відповідно методів теорії нечітких множин.

Конкретний вибір критерію якості визначається багатьма факторами: специфікою задачі, що вирішується, характером та складністю об'єкта, досвідом розробника, обсягом вихідної апріорної інформації, а також простотою та можливістю реалізації алгоритмів керування об'єктом.

Для вибору відповідного критерію можна ґрунтуватися на принципах:

- компромісу між адекватністю, математичною простотою та простотою технічної реалізації;
- інформаційної недостатності та невизначеності, тобто відсутності точної інформації, що вимагає вибору критерію, який підпорядковується оперативності прийняття рішень;

- відносності критерію, тобто відсутності загальнопрактичних рекомендацій щодо переваги вибору критерію із можливого класу критеріїв, а це певне мистецтво в рамках системології.

Виходячи із запропонованої на рис. 2.2 дворівневої ієрархічної структури необхідно обґрунтувати критерії оптимізації для середнього організаційно-диспетчерського рівня та контурів керування РО на нижньому рівні.

Середній рівень СК РТ можна розглядати як дискретно-подійний, на якому рішення приймається в залежності від подій, що характеризують керування РО: завантаженість напрямків перевезень РО, наявність додаткових РО, необхідність формування-розформування поїздів та ін.

Моделі підсистем СК РТ доцільно формувати на основі графових структур, бо вони наочно відображають географічний характер рейкової транспортної топології (полігони залізниць, пасажирські, товарні, сортувальні станції).

Доцільно розробляти раціональні графові структури, які відрізняються скороченою кількістю елементів (наприклад, вершин, переходів, ребер). У наступних розділах дисертації розроблено нові графові структури для моделей диспетчерських підсистем, які відрізняються новими розширеннями: квазідвонаправленістю ребер, багатофункціональністю переходів та ін., що значно спрощує моделі.

За рахунок спрощення моделей з'являється можливість скорочення терміну моделювання різних ситуацій з керування РО, що дає змогу більш оперативно формувати керуючі дії та прогнозувати ситуації.

Основна задача середнього рівня – оперативне формування задаючих впливів на контури керування РО. За основний критерій оцінки якості функціонування моделей середнього рівня приймаємо *оперативність прийняття рішень* (при високій достовірності).

2.3.2. Критерій оптимізації при моделюванні на основі графових структур

У подальших розділах для побудови моделей підсистем середнього рівня використовуються мережі Петрі.

Автоматизоване керування рейковим транспортом супроводжується передачею значних обсягів інформації між станціями [130, 131]. Існуючі системи будуються на основі локальних обчислювальних мереж (ЛОМ). ЛОМ повинні забезпечувати обробку інформації з метою реалізації у середовищі мережі ряду задач моделювання.

У залежності від специфіки ЛОМ, у якій розв'язуються задачі моделювання, а також від обраної структури моделі можна використовувати різні критерії оптимізації [142]. Враховуючи необхідність реалізації ряду моделей, важливе значення має оперативність прийняття рішення в залежності від виробничих ситуацій, які виникають. У нашому випадку час прийняття рішення в найбільшій мірі визначається витратами часу й обчислювального ресурсу на моделювання із метою зіставлення варіантів керування і вибору

найбільш доцільного.

При оцінці витрат часу на моделювання необхідно розглядати усі фактори, що впливають на функціонування програмного комплексу, що забезпечує реалізацію моделей. Для цього можна використати різні часткові показники, що характеризують апаратні і програмні засоби. Можна виділити такі показники для оцінки:

q_1 - ресурсів інтерфейсу ЛОМ;

q_2 - ресурсів вузлів мережі;

q_3 – витрат часу системного програмного забезпечення;

q_4 – витрат часу на виконання програм моделі в середовищі ЛОМ;

q_5 – витрат часу на обмін інформацією між вузлами ЛОМ.

У кожній із груп показників q_j виберемо підмножину показників $q_j^{(0)}$ ($q_j^{(0)} \in q_j$), що мають найбільший вплив на час виконання моделі, таких як швидкість каналу, частота процесора, час обробки транзакцій прикладних програм, кількість циклів прикладних програм і т.п. Тоді кількісна оцінка для кожного з показників q_j визначається як

$$q_j = \sum_{i=1}^n \alpha_i q_j^{(0)} \quad (2.8)$$

де α_i - ваговий коефіцієнт; $q_j^{(0)}$ - мінімальне значення обраного

показника $q_j^{(0)}$, обумовлене вимогами до моделі; q_j - значення

основного показника q_j , обумовлене характеристиками ЛОМ.

Сформульована задача багатокритеріального вибору відповідає вибору точки z у просторі P варійованих параметрів розглянутого апаратно-програмного комплексу усередині області дозволених рішень, яку обмежено гіперплощинами P_i :

$$z \in P \quad (2.9)$$

Врахування обмежень призводить до визначення підмножини P_d дозволених точок простору кількісних оцінок P : $P_d \subset P$.

Для вибору точки $z \in P_d$ існують різні підходи:

- заміна багатьох критеріїв одним;
- ранжування часткових підмножин критеріїв з наступною оптимізацією головного з множини критеріїв;
- послідовна оптимізація всіх критеріїв.

Однак для всіх перелічених підходів вимагаються додаткові дані:

- визначення вагових коефіцієнтів для оцінюваних параметрів;
- вибір методу ранжування і параметрів поступок по параметрах;

- визначення послідовності оптимізації розглянутих часткових критеріїв.
Для визначення додаткових даних необхідно більш детально розглянути всі складові програмного комплексу.

Основним елементом інфраструктури перевезень за допомогою РО є полігон Укрзалізниці з "центральними" станціями залізниць і зв'язаними з ними "радіальними" ділянками - гілками. Наприклад, для Південної залізниці залізничний вузол Харків має дев'ять пар гілок, що обслуговуються рядом станцій, наприклад трьома станціями для напрямку Красноград чи десятьма для напрямку Білопілля (рис. 2.6).

На кожному з напрямків при організації руху РО розв'язується ряд технологічних задач (d), орієнтовний перелік яких наведений у табл. 2.2.

Кожному напрямку у відповідність може бути поставлена матриця, розмірність якої дорівнює $K=k \times d$ (число станцій помножена на число задач) (табл. 2.3, 2.4). У рядках цих таблиць розташовані типи задач, розв'язуваних у процесі перевезень на відповідних станціях, а в стовпцях найменування станцій за напрямками.

У наведеному прикладі зазначена процедура призводить до побудови десяти матриць відповідно до напрямків, включаючи матрицю для залізничного вузла Харків.

Рис. 2.6. Узагальнена схема залізниці для визначення задач локального рівня (кчисло станцій на напрямку) на прикладі Південної залізниці

Типи задач, які можуть вирішуватися на станціях

Код задачі, d	Технологічні задачі
1	Формування поїздів
2	Навантаження-розвантаження поїздів
3	Організація руху поїздів від станції
4	Організація руху поїздів до станції
5	Керування відправленням поїздів
6	Керування прийманням поїздів
7	Врахування фінансово-економічних показників
8	Оцінка витрат на ремонтно-аварійні роботи
9	Формування інформації про процес руху поїздів на станціях та перегонах, її передача (СЦБ, зв'язок)
10	Визначення показників безпеки
11	Визначення параметрів дислокації поїздів

Таблиця 2.3

Матриця типу "станції-задачі" для напрямку 1-Харків-Красноград

Станції, k			Код задачі, d
1	2	3	
1	0	1	1
1	1	1	2
1	1	1	3
1	0	0	4
1	1	1	5
0	0	1	6
1	1	1	7
1	0	0	8
1	1	1	9
1	0	0	10
1	1	0	11

Позначивши інтенсивність виконання в j -му вузлі задач m -го типу як a_{dj} , інтенсивність надходження задач d -го типу через λ_d , час розв'язання d -тої задачі в j -му вузлі складе

(де u_d - трудомісткість d -тої задачі). У ролі критерію якості доцільно вибрати мінімізацію загального часу розв'язання задачі моделювання у вигляді:

(2.10)

Таблиця 2.4

Матриця типу "станції-задачі" для напрямку 6-Харків-Білопілля

Станції, k											Код задачі, α
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	0	0	1	0	0	0	1	0	1		1
0	1	0	1	0	0	1	0	0	1		2
0	0	0	1	1	0	1	1	0	1		3
1	1	0	0	0	1	0	1	0	1		4
0	0	1	0	1	0	1	0	1	1		5
0	0	0	1	0	0	0	0	0	1		6
0	1	0	0	0	1	0	1	0	1		7
0	0	0	1	0	1	0	0	0	1		8
0	0	0	0	0	0	0	1	0	1		9
0	0	0	0	0	1	0	0	0	1		10
0	0	0	1	0	0	0	1	0	1		11

Станцію кожного напрямку будемо вважати інформаційним вузлом, для кожного з яких будується матриця розміром $(k \times d)$. Як випливає з табл.2.3, для напрямку 1 Харків - Красноград матриця "станція – задачі" має розмірність $(k \times d) = (3 \times 11) = 33$, а, наприклад, для напрямку 6 Харків-Білопілля $(k \times d) = (10 \times 11) = 110$. Елементом матриць є булева змінна x_{dj} , яка дорівнює 1, якщо присутня відповідна задача на станції, або 0, якщо відсутня. Отже, матриця відбиває розподіл задач табл. 2.3 за напрямками. Як приклад розглянемо табл. 2.4, у якій наведено розподіл (наявність) задач по станціях. Інформація, наведена у табл.2.3, 2.4, дозволяє оцінити загальне число задач, які необхідно моделювати у вигляді залежності

(2.11)

де код задачі;

- число станцій (інформаційних вузлів);

- число напрямків на залізниці.

Так, наприклад, з урахуванням прийнятих обмежень ($d=11$) загальне число задач, які необхідно моделювати для станцій та напрямків Південної залізниці, складає

$$q=(3+4+5+8+6+10+4+9+9) \cdot 11=638.$$

Проведений аналіз множини задач показав, що серед обраної підмножини показників найбільш суттєвими при одночасному виконанні ряду моделей є такі:

- параметр, що відбиває астрономічний час перебування окремої моделі у системі;
- параметр, що визначає сумарний час, витрачений центральними процесорами вузлів ЛОМ на виконання окремої моделі;
- параметр, що визначає сумарний обсяг зовнішньої пам'яті вузлів ЛОМ, потрібний для кожної окремої моделі;
- параметр, що визначає сумарні обсяги задіяної оперативної пам'яті;
- параметр, що визначає сумарну пропускну здатність задіяних при виконанні кожної окремої моделі каналів ЛОМ;
- параметр, що визначає сумарний час обробки транзакцій активної моделі.

Отже, узагальнений показник часу моделювання T можна визначити за допомогою функціонала

$$, \quad (2.12)$$

де - багатопараметрична функція, що визначає значення функціонала на основі вагових коефіцієнтів параметрів з урахуванням рангу кожного з них.

Аналіз характеристик вузлів ЛОМ, а також наявність можливості розширення оперативної і зовнішньої пам'яті для всіх задіяних вузлів ЛОМ

показами, що параметри і не мають істотних обмежень на час виконання моделі.

Тому можна припустити, що для T існує кількісна оцінка, яка обчислюється для конкретної архітектури ЛОМ. У цьому випадку

багатопараметрична функція може бути подана лінійною комбінацією змінних, які визначають витрати часу на прикладному рівні ЛОМ для програмних комплексів, що реалізують моделі з множини q , тобто

$$, \quad (2.13)$$

де - ваговий коефіцієнт розглянутого параметра з множини ;

- коефіцієнт, що враховує інтенсивність інформаційних потоків групи моделей з

, визначених розбивкою на даній множині, що впливають на розмір відповідного параметра з .

Крім часового функціонала , важливим фактором як на стадії розроблення програмного комплексу, так і на етапах його розширення є оцінка часових витрат на розроблення відповідних прикладних програм, що істотно залежать від математичного апарату, застосованого як при постановці задачі, так і при безпосередньому програмуванні.

Наведені результати показують, з одного боку, необхідність удосконалення комп'ютерної і телекомунікаційної мереж залізниць, а з іншого необхідність одержати кількісну порівняльну оцінку ефективності застосування для моделювання квазідвонаправлених мереж Петрі у порівнянні з класичними мережами Петрі.

2.3.3. Оцінка оперативності задач моделювання

За основний критерій оцінки якості функціонування моделей диспетчерських підсистем приймаємо *оперативність прийняття рішень* в залежності від результатів моделювання. На оперативність прийняття рішень суттєво впливає *термін реалізації моделей*. Оперативність прийняття рішень важлива у тому сенсі, що вона обмежена часовим інтервалом, який обумовлений сталими часу КК нижнього рівня та складає кілька секунд.

При аналізі процедур розв'язання задач моделювання час їх функціонування може задаватися у термінах кількості елементарних кроків (арифметичних, логічних операцій, порівнянь та ін.), які необхідні для реалізації цих процедур.

Число кроків, які реалізуються відповідним алгоритмом, залежить від розмірності вектора вихідних даних. При цьому число кроків алгоритму у найгіршому варіанті треба розглядати на усій сукупності вказаних векторів.

У задачах моделювання вектором входів може бути: граф, множина цілих чисел, сукупність кінцевих множин і т. ін.

Для розв'язання задачі вихідні дані треба подавати у вигляді послідовності символів вихідних даних. У зв'язку з тим, що вихідні дані до алгоритму моделювання подаються у вигляді послідовності символів, можна задати вхідний набір як довжину цієї послідовності, тобто як кількість символів у ній.

При аналізі алгоритмів необхідно враховувати швидкість зростання складності алгоритмів моделювання [143].

Уведемо функції i , які визначені на множині цілих позитивних чисел та набувають позитивних дійсних значень.

Позначимо

для випадку, коли існує така константа , що для достатньо великих n ,

та
 для випадку, коли існують константи , що для
 достатньо великих n .

Співвідношення є співвідношенням еквівалентності. Клас еквівалентності цього співвідношення, який містить (тобто множину усіх функцій таких, що), називають швидкістю зростання [143].

Завдяки введеному поняттю швидкість зростання складності алгоритму [144, 145] можна оцінити зверху, використовуючи вираз “потребує часу”.

Таким чином, часова складність алгоритму відображує витрати часу, які потрібні для його реалізації. Функція, яка вхідним даним довжини n ставить у відповідність максимальний час, не буде повністю визначена доти, поки не зафіксовано метод кодування, не обрано відповідний обчислювальний пристрій. Один і той же алгоритм можна реалізувати за різний час на різних структурах. Тому при переході від однієї структури до іншої використовують поняття ємності складності обчислювальної системи, яка характеризує зростання апаратних витрат при такому переході. Апаратні витрати можуть задаватися числом, наприклад, елементарних процесорних елементів та ін. При цьому використовується вираз “потрібно процесорних елементів” [146]. При аналізі складності алгоритмів оцінка у найгіршому випадку не завжди об’єктивно несе інформацію про час, який витрачається алгоритмом на розв’язання задачі, тому що найгірші випадки можуть бути рідкими, тому для кожного алгоритму теоретично визначимо складність у найгіршому випадку, а при експериментальному моделюванні роботи алгоритмів виконується оцінка їх складності у середньому, що дозволяє більш об’єктивно оцінювати можливості алгоритму.

Оперативність розв’язання задач моделювання, що витікає із складності алгоритму, за час, що не перевищує дозволений час , будемо оцінювати кількісно ймовірністю розв’язання комплексу задач за час , який не перевищує

$$(2.14)$$

У системах моделювання, призначених для оперативного розв’язання задач автоматизованого керування РО, у ролі узагальненого показника оперативності розв’язання задач можна використати ймовірність розв’язання задачі на інтервал часу (- критичний час, після якого мета управління не може бути досягнута, - час циклу у системі), після закінчення якого мета моделювання не може бути досягнена

$$(2.15)$$

- де
- коефіцієнт готовності системи;
 - час напрацювання моделюючої системи на відмову.

Виходячи з часових вимог, які необхідно виконувати при побудові контурів керування нижнього рівня СК РТ, можна ввести обмеження на час моделювання задач середнього рівня СК РТ. Цей час обумовлений постійними часу об'єктів керування нижнього рівня, тобто рухомих одиниць.

Як буде показано у розділі 3, використання квазідвонаправлених мереж Петрі, запропонованих у дисертації, дозволяє значно скоротити кількість ребер у графах, які відображують аналізовані моделі перевезень, та відповідно зменшити час моделювання.

Зменшення часу моделювання можна оцінити коефіцієнтом прискорення

де та - відповідно час моделювання для звичайних та квазідвонаправлених мереж Петрі.

З урахуванням співвідношення (2.15) можна визначити показник оперативності як ймовірність виконання i -тої задачі моделювання за час, який не перевищує ,

(- деякий середній час моделювання задачі)

Час моделювання i -тої задачі істотно залежить від числа ребер у графі моделі, а також від ряду інших параметрів, які зменшують час моделювання при використанні квазідвонаправлених мереж Петрі. Розрахувати та побудувати графіки залежності показника оперативності при моделюванні різних задач керування, моделі яких мають однакове значення параметра, від числа ребер у графі (рис. 2.7.).

При побудові графіків для кожного числа ребер у моделі генерувалося не менше 50 різних задач моделювання для різних можливих характеристик досліджуваної моделі, які змінюються за заданим законом.

Точка на графіку при заданому числі ребер визначалася як середнє значення , яке отримано на 50 вказаних реалізаціях. Усі результати моделювання одержані з довірчою ймовірністю 0,95.

Крива 1 відповідає моделюванню з використанням квазідвонаправлених мереж Петрі, а крива 2 – з використанням класичних мереж Петрі. Як видно, використання для моделювання квазідвонаправлених мереж Петрі суттєво підвищує рівень оперативності прийняття рішень.

У ієрархічних системах управління основною задачею є прийняття коректного (правильного) рішення щодо поточних змін внутрішніх та зовнішніх збурень та змін. Усі існуючі критерії якості не дають такої оцінки. Наприклад, критерій зменшення енерговитрат покращує економічні показники системи, яка взагалі функціонує не оптимально. Те саме можна сказати про

критерій мінімізації часу перехідних процесів, критерій стійкості та ін. Усі ці критерії доцільні тільки при правильному виборі завдань на контури керування.

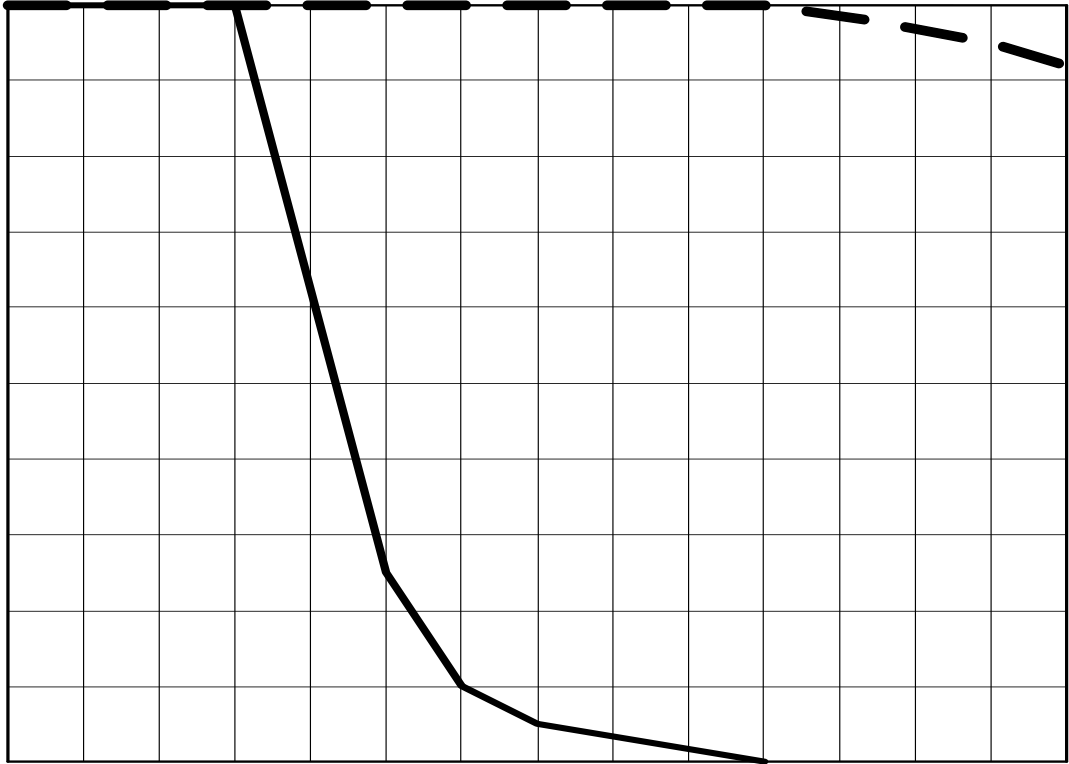


Рис. 2.7. Залежність імовірності моделювання від кількості ребер у графі (1 – квазідвонаправлені, 2 – класичні мережі Петрі)

Найбільш близька до проблеми багатофакторного оцінювання альтернативних рішень теорія корисності [147]. Згідно з цією теорією можна сформулювати функції корисності, коли одне рішення краще за інше, яке може бути і не зовсім правильним.

Однією з відмінностей СК РТ у порівнянні з іншими технічними системами є необхідність вибору управляючих впливів в умовах невизначеності. Якщо функціонування регуляторів контуру керування нижнього рівня визначається на основі фізичних законів та числових характеристик об'єктів керування, то вибір диспетчерського організаційно-ситуаційного управління має якісний характер. Особливо важливим є твердження, що «управління складними об'єктами принципово неможливо без використання інформації, яка не може бути визначена якісно» [148-150].

Повна формалізація поведінки об'єкта керування неможлива виходячи з такого:

- необхідність корегування мети керування та критеріїв оцінки якості керування, в тому числі внесення змін з метою поліпшення процесу керування при виникненні непередбачених обставин;
- необхідність сприймання та творчої обробки інформації;
- неможливість визначення управління тільки якісними співвідношеннями;
- неможливість врахування та опису формальними засобами зміни у часі параметрів та структури об'єкта.

У організаційно-диспетчерських підсистемах неможлива формалізація управління, бо обов'язковою компонентою управління є людина-диспетчер. Це приводить до певного суб'єктивізму при прийнятті рішень в умовах невідомості. В таких умовах важливе значення мають неформалізовані знання. Вони відіграють важливу роль, коли мова йде про впевненість у правильності прийняття оперативних рішень. Тобто **впевненість у правильності прийняття оперативних рішень** має бути складовою критерієм оперативності прийняття рішень [151, 152, 159].

Сучасний стан теорії управління показує, що при побудові складних систем доцільно враховувати всі діючі фактори, що можливо в результаті використання нечіткої логіки та апарату нечіткого виведення, який спирається на нечіткі правила продукції.

Основні етапи нечіткого виведення такі:

- нормалізація вхідних змінних;
- формалізація бази правил нечіткого висновку;
- фазифікація вхідних змінних;
- агрегація підумов у нечітких правилах продукції;
- активізація або композиція підвисновків у нечітких правилах продукції;
- акумуляція висновків нечітких правил продукції;
- дефазифікація вихідних змінних;
- денормалізація вихідних змінних.

У процедурах нечіткого виведення використовуються підумови правил нечітких продукцій на основі вхідних та вихідних лінгвістичних змінних.

База правил нечітких продукцій вважається заданою, якщо задані три множини:

- множина правил нечітких продукцій;
- множина вхідних лінгвістичних змінних;
- множина вихідних лінгвістичних змінних.

Вхідна та вихідна лінгвістичні змінні задані, якщо для них визначені базові терм-множини з відповідними функціями приналежності кожного терму, а також дві процедури синтаксично G та семантично Q .

Широко використовуються у ролі функцій приналежності трикутники або трапеції.

Розглянемо абстрактний приклад, коли значення змінної «швидкість рухомої одиниці» необхідно знайти із деякої сукупності термів з відповідними ступенями належності (рис. 2.8)

Рис. 2.9, а, б, в відповідають правила

(2.16)

Етап активізації системи нечіткого висловлювання приводить до виділення термів, які позначені чорними трапеціями.

Акумуляція вказаних термів приводить до узагальненого терму, показаного на рис. 2.9.

Відомі кілька алгоритмів нечіткого висловлювання: Мамдані, Цукамото, Ларсена, Сугено [13-20, 29]. Всі ці алгоритми включають вказані вище етапи, вони відрізняються методом дефазифікації вихідних змінних.

На рис. 2.9 показані можливі варіанти дефазифікації, до яких відносяться:

- метод лівого модального значення – значення вихідної змінної визначається як найменша мода нечіткої множини (для рис. 2.9 – ліве модальне значення приблизно дорівнює $y \approx 16$ км/год);
- метод правого модального значення для прикладу рис. 2.9 дає $y \approx 36$ км/год;
- метод центру ваги, при цьому центр ваги замальованої фігури знаходиться за формулою

(2.17)

і дорівнює ≈ 27 км/год.

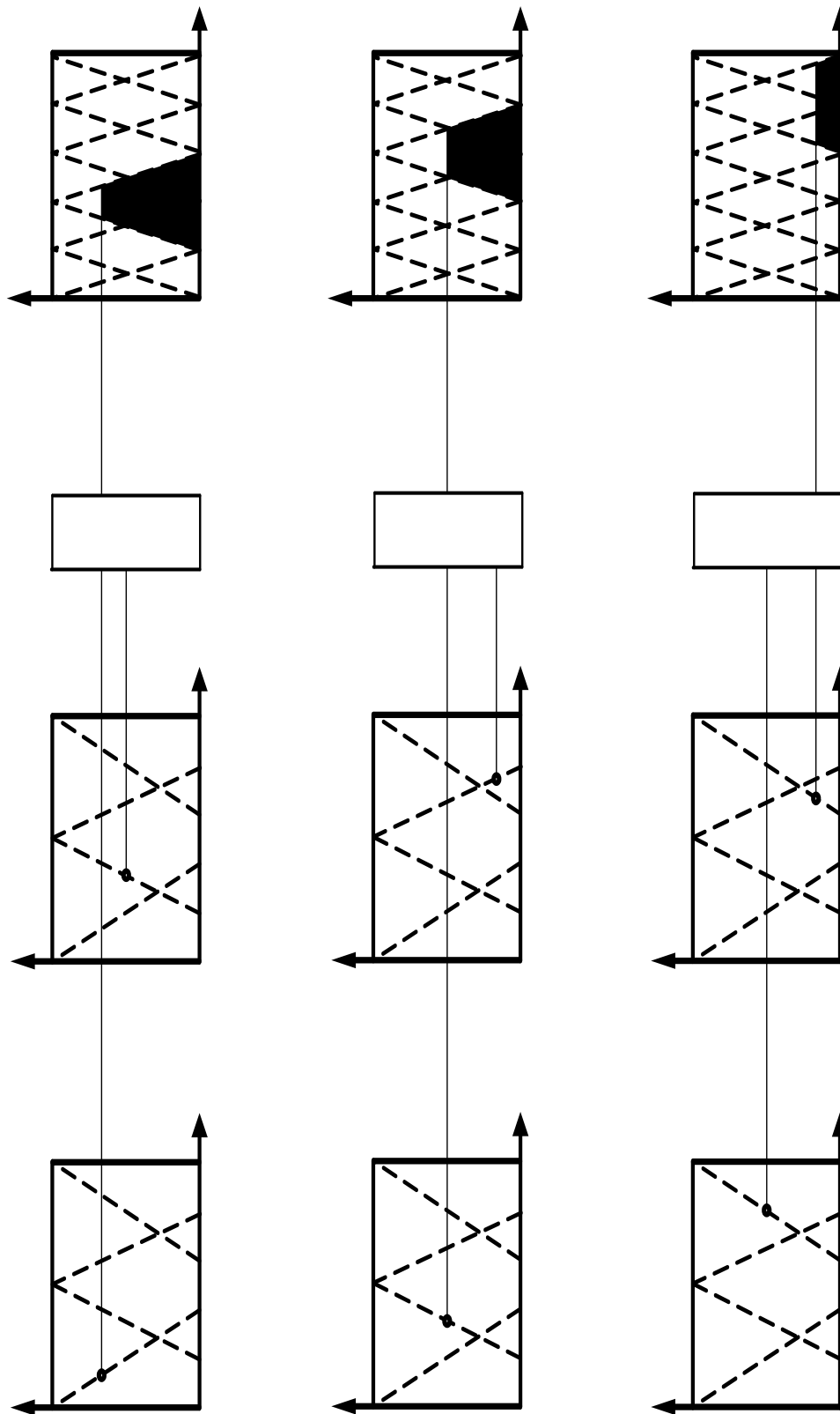


Рис.
2.8.
Приклад
формуван
ня бази
правил
продукції
йної
системи
нечіткого
висловлю
вання: x_1 ,
 x_2 –
нормован
і
швидкіст
ь та
відхилен
ня від
заданої
швидкост
і, y_i –
абсолютн
а
швидкіст
ь у
кілометра
х на
годину (км/год)

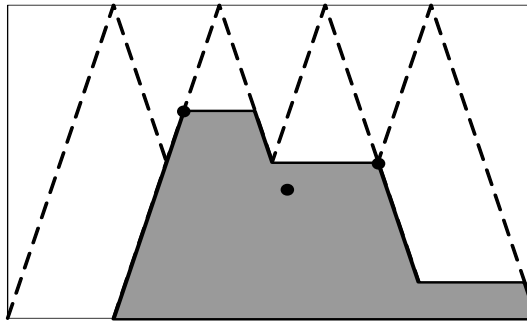


Рис. 2.9. Приклад визначення швидкості на основі термів множин «швидкості РО»: 1, 3, 2 - відповідно ліве, праве модальні значення та центр ваги

Крім того існує спрощений метод нечіткого виведення. У базі правил використовуються тільки нечіткі продукції у формі

ПРАВИЛО <#>: ЯКЩО « » та « », то « ».

Акумуляція висновків нечітких правил продукції при останньому методі фактично відсутня, розрахунки виконуються з дійсними числами, тому що тут - деякі дійсні числа.

2.3.4. Оцінка впевненості у правильності формування керуючих дій

Площа замальованої фігури (рис. 2.9), отриманої в результаті акумуляції, може у певному сенсі характеризувати інтегральну оцінку *ступеня впевненості у правильності прийняття рішення*.

Усі відомі критерії якості систем управління дозволяють заощаджувати ресурси, змінювати складність структури, підвищувати швидкість або живучість і т.ін. Але усі вони не реалізують вимоги, яка сприяє підвищенню безпеки складної СК РТ, – правильності прийняття поточного управляючого впливу з врахуванням усіх збудуючих факторів.

База правил систем нечіткого виведення призначена для формального подання емпіричних знань або знань експертів у тій чи іншій проблемній галузі. Використовуються правила нечітких продукцій, сукупність яких називають базами нечітких продукцій, що узгоджені у термінах нечітких лінгвістичних змінних.

Частіше база правил формується у вигляді структурованого тексту

$$\text{RULE}_1: \text{IF Condition}_1 \text{ THEN Conclusion}_1(F_1) \quad (2.18)$$

$$\text{RULE}_n: \text{IF Condition}_n \text{ THEN Conclusion}_n(F_n)$$

Через α_i позначені вагові коефіцієнти відповідних правил, які можуть набувати значень у інтервалі $[0,1]$.

Лінгвістична змінна визначається кортежем (x_1, x_2, \dots, x_n) ,

де x_i - найменування лінгвістичної змінної;

T - базова терм-множина значень (n термів);

X - область визначення нечітких змінних, які входять у T ;

G - синтаксична процедура утворення T ;

S - семантична процедура, що визначає зміст відповідної нечіткої множини.

У ролі умов та висновків можуть бути використані тільки нечіткі лінгвістичні висловлення типу (2.18), причому в кожному з нечітких висловлень повинні бути визначені функції приналежності значень термів для усіх лінгвістичних змінних.

Розглянемо рис. 2.10. На ньому показано формування бази правил для системи нечіткого виведення. Рис. 2.10, *a* відповідає традиційним підходам.

Процедура непрямого нечіткого виведення. Замість наведеного методу дефазифікації з обчисленням інтегралів, сформуємо інший підхід до побудови акумульованого терму.

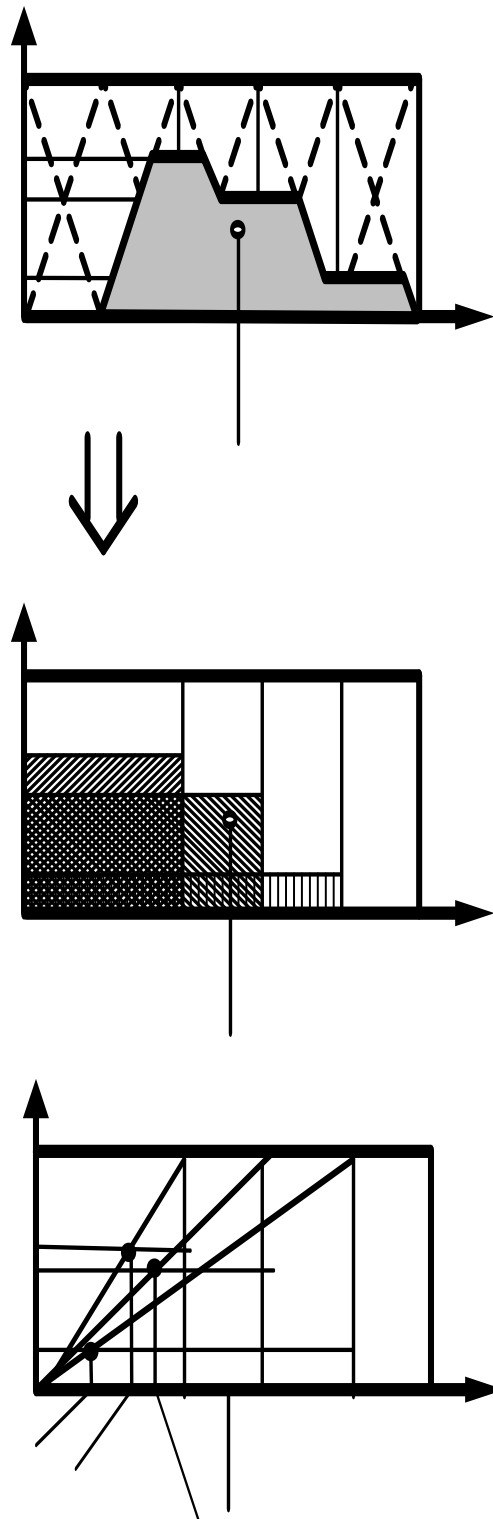


Рис. 2.10. Приклад формування бази правил системи нечіткого висловлювання: S , M , B – терми; - швидкість в абсолютних одиницях, км/год

Для обчислення центру ваги будемо будувати фігури на основі прямокутників у відповідності до рис. 2.10, б.

Сформуємо прямокутники з площинами

(2.19)

Для сукупності цих площин має місце узагальнена площина із центром ваги

км/год. (2.20)

У площині (2.20) можуть бути зіставлені лінії, які з'єднують початок координат з вершинами відповідних термів (рис. 2.10, в). Перетин цих ліній з відповідними рівнями дає значення

км/год.

Для визначення оціночного значення запишемо

км/год.

Як бачимо значення та співпадають.

Таким чином для визначення у загальному випадку можна записати

(2.21)

Вираз (2.21) дозволяє оцінити впевненість у правильності прийняття рішень без обчислення інтегралів відповідно до виразу (2.17).

2.3.5. Критерій максимального ступеня стійкості для синтезу контурів керування РО

Нижній рівень ієрархії СК РТ включає в себе динамічні контури керування РО.

До теперішнього часу більшість контурів керування об'єктами у різних галузях промисловості та на залізничному транспорті синтезується на основі лінійних законів керування. Крім того, досліджуються в основному детерміновані варіанти побудови контурів керування.

Рухомі одиниці залізничного транспорту знаходяться під впливом випадкових збурень (транспортні перешкоди, які викликають непередбачені затримки поїздів, випадкове завантаження РО та ін.). Сигнали, що характеризують параметри РО, мають значні випадкові складові (завади які викликаються нелінійними складовими тягового струму, живильної мережі, завадами від систем супутникового радіозв'язку та ін.)

У таких умовах важливою проблемою є оптимізація параметрів руху, а також виділення сигналів із суміші сигнал/завада – фільтрація сигналів.

Використовуючи лінійні моделі РО, можна прийняти при синтезі контурів керування РО теорему розподілення Wonham W. [107] . На основі цієї теореми

синтез завадостійких контурів керування можна розділити на синтез оптимальних детермінованих контурів керування та оптимальних завадостійких фільтрів. Це особливо важливо в умовах змінних параметрів РО та сигналів, що потребує використання методів адаптації.

У цьому випадку можливо використовувати різні критерії при синтезі адаптивних контурів керування та фільтрів.

У більшості випадків синтез КК для РО виконується на основі інтегральних критеріїв якості [66, 67]. Використання таких критеріїв не дозволяє отримати прості аналітичні залежності для налаштування параметрів регуляторів.

Використання критерію максимального ступеня стійкості [90] для синтезу КК рухомими одиницями, моделі яких наведено у розділі 7, дає змогу отримати інженерні співвідношення, що забезпечують високу якість процесів керування РО, та спрощує процедуру побудови адаптивних контурів керування.

Синтез контурів керування РО на основі критерію максимального ступеня стійкості наведено у розділах 7,8.

Місце розглянутих вище критеріїв показано на рис. 2.11. Критерії, що подані у тонованих областях, для синтезу СК РТ використані вперше.

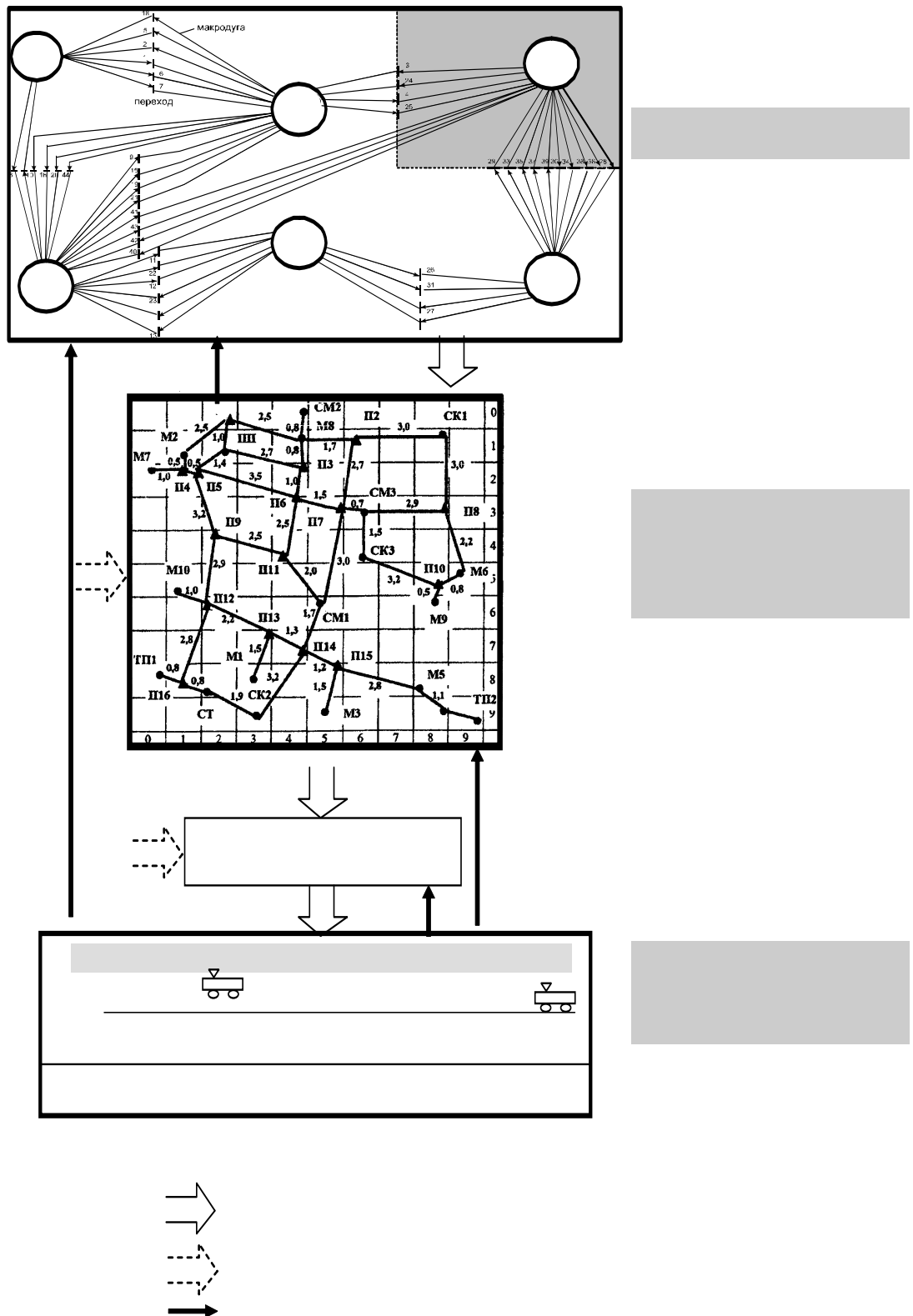


Рис. 2.11. Критерии оптимизации СК РТ

Висновки

Сукупність сформульованих у цьому розділі положень являє собою концепцію побудови перспективних СК РТ, які забезпечать удосконалення експлуатації засобів рейкового транспорту. При цьому:

1. Запропоновано декомпозицію СК РТ на два рівні: середній – дискретно-подійний рівень оперативно-диспетчерського керування, який повинен функціонувати у нечітких ситуаціях, та нижній – безпосереднього автоматизованого керування швидкістю рухомих одиниць, моделі яких враховують їх реальні динамічні властивості.

2. Розроблено вимоги до моделей диспетчерських підсистем сигналізації середнього рівня з врахуванням нечітких ситуацій, які основані на графових структурах з розширеними функціями, що спрощує процедуру вироблення керуючих дій в контури керування нижнього рівня.

3. Вперше розроблено критерій оперативності прийняття рішень на середньому диспетчерському рівні СК РТ. Доведено, що використання цього критерію при зменшенні числа елементів у графових структурах значно скорочує термін (час) вироблення керуючих дій. Крім того, запропоновано процедуру оцінки впевненості у правильності прийняття рішень без обчислення інтегралів на етапі дефазифікації.

4. У ролі моделей рухомих одиниць прийняті динамічні ланки із розподіленими параметрами, що дає змогу врахувати реальні динамічні процеси при автоматизованому керуванні швидкістю рейкових засобів залізниць.

5. Запропоновано використання критерію максимального ступеня стійкості для вибору параметрів настроювання адаптивних контурів керування РО нижнього рівня систем.

—

**РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА КОМПЛЕКСУ МОДЕЛЕЙ ПІДСИСТЕМ
СЕРЕДНЬОГО РІВНЯ НА ОСНОВІ
КВАЗІДВОНАПРАВЛЕНИХ МЕРЕЖ ПЕТРІ З НОВИМИ
ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ПЕРЕХОДАМИ**

**РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МЕТОДУ АДАПТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ
СИГНАЛІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСТОВІРНОЇ
ІНФОРМАЦІЇ ПІДСИСТЕМ ТС**

**РОЗДІЛ 5. РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПОБУДОВИ КОНТУРІВ
КЕРУВАННЯ РУХОМИМИ ОДИНИЦЯМИ НА ОСНОВІ
АДАПТАЦІЇ ТА НЕЧІТКИХ МНОЖИН**

ВИСНОВКИ

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

ДОДАТКИ

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ РОЗШИРЕНИХ ГРАФОВИХ МЕРЕЖ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВННЯ РЕЙКОВИМ ТРАНСПОРТОМ

Процеси керування рейковим транспортом залізниць прив'язані до географії розташування рейкових ліній. Тому для моделювання цих процесів доцільно обрати метод моделювання, який адекватно відтворює технологічні процеси перевезень. Таким методом може бути метод розширених графових мереж

3.1. Особливості графових мереж

Одним з найпоширеніших класів мереж є мережі Петрі (МП), які являють собою сучасний математичний інструмент для створення моделей різних систем.

Реальні системи функціонують у часі й просторі. МП дозволяють описувати як потоки даних, так і загальне поведіння систем управління технологічними процесами. З погляду теорії графів МП є орієнтованим графом, який включає позиції, переходи та дуги (ребра) [136, 137].

У МП використовуються мітки (фішки) в ролі ресурсу. Установлення фішок у відповідні позиції називають розміткою мережі. Кажуть, що МП функціонує, переходячи від однієї розмітки до іншої.

Тупиковою називають розмітку, при якій не може спрацювати жоден перехід. Перехід може спрацювати тільки тоді, коли у всіх його вхідних позиціях є хоча б по одній фішці. Перехід, спрацьовуючи, видає рівно по одній фішці з кожної вхідної позиції й утворює по одній новій фішці у своїй вихідній позиції (тобто тій, у яку веде дуга від даного переходу). Якщо в МП є один перехід, що може спрацювати, він обов'язково спрацює. Якщо

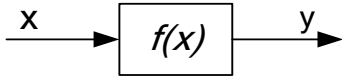
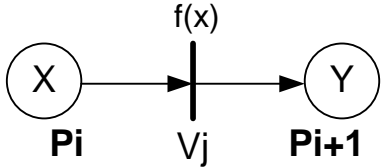
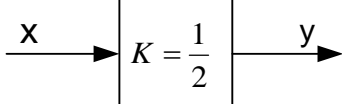
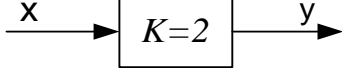
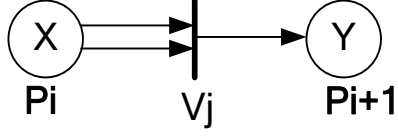
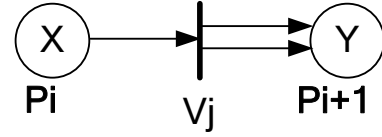
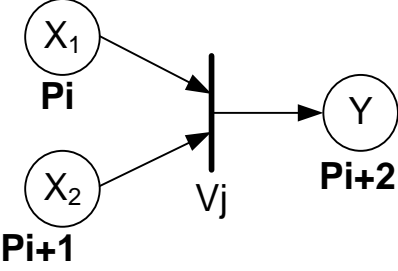
можуть спрацювати два або більше переходів, то вони спрацьовують послідовно, але недетерміновано (випадково), тобто не можна заздалегідь знати, який саме перехід повинен спрацювати.

Таким чином, функціонування МП можна трактувати як недетерміновану послідовність дискретних подій.

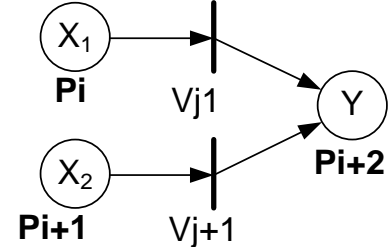
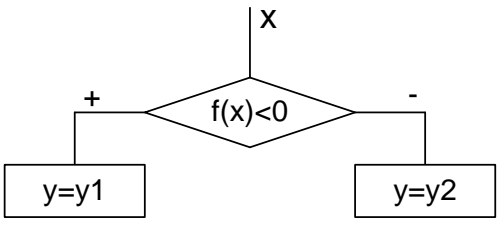
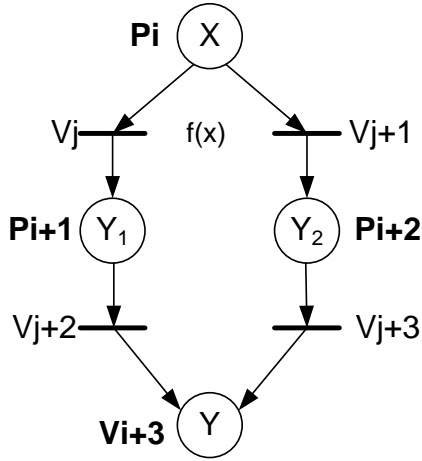
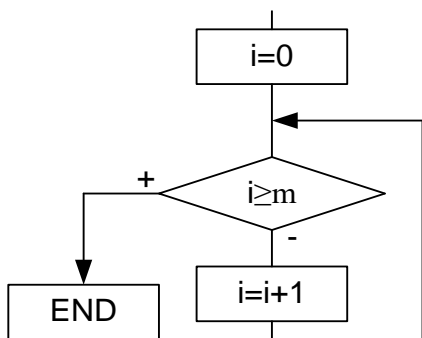
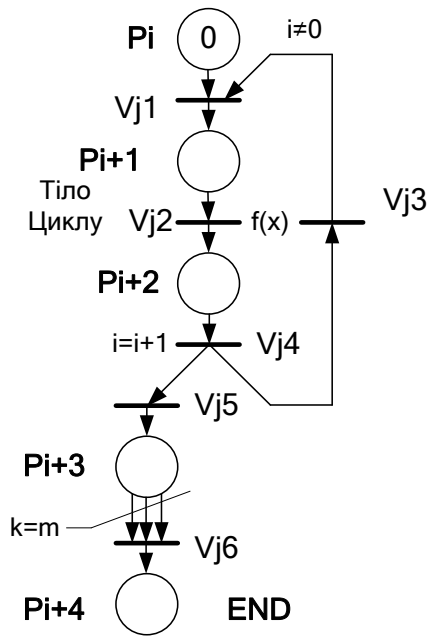
У табл. 3.1 наведені основні структурні динамічні й логічні елементи систем та відповідні їм елементи МП.

Таблиця 3.1

Основні структурні елементи МП

№	Елементи структурних схем систем	Відповідні елементи МП
1	2	3
1	<p>Функція $f(x)$</p> 	
2	<p>Коефіцієнт передачі</p>  	 
3	<p>Кон'юнкція $Y=X_1 \wedge X_2$; логічна операція «I (Min)»; квантор загальності ALL (для всіх x із X)</p>	

Продовження табл. 3.1

1	2	3
4	<p>Диз'юнкція $Y = X_1 \vee X_2$; логічна операція «АБО (Max)»; квантор існування $\exists x \in X$ (для кожного x із X)</p>	
5	<p>Умовний перехід; імплікація $X \rightarrow Y$ (ЯКЩО X, ТО Y)</p> 	
6	<p>Цикл <i>DO - WHILE</i></p> 	

Інтегрований процес керування рейковим транспортом вимагає реалізації ресурсозберігаючих технологій і організації раціональних перевезень пасажирів і вантажів.

Удосконалюванню керування буде сприяти створення перспективної СК РТ, що у своєму складі повинна мати підсистеми моделювання, прогнозування й керування РО. Це дозволить істотно розширити функції диспетчерського персоналу за рахунок інтелектного забезпечення процесу формування керуючих дій щодо керування РО.

Керування рухом РО здійснюється на основі виконання технологічних операцій, які відбуваються в реальному часі, і являє собою ланцюг послідовних взаємообумовлених дискретних подій. Ці події виникають і змінюються в результаті впливів на технологічний процес збурювань, якими є, наприклад, заявки на перевезення, зміну графіка руху й т.п.

Процес керування засобами рейкового транспорту на полігонах залізниць являє собою замовлення вагонів, їхнє завантаження, формування з них на сортувальних станціях поїздів; організацію руху сформованих поїздів по відповідних напрямках (станції, гірки, транспортні коридори); переформування поїздів (якщо буде потреба); організацію їхнього руху; перевезення пасажирів і доставку вантажів клієнтам.

При реалізації процесів керування рейковим транспортом велике місце займають маневрові роботи на різних станціях, які являють собою пересування РО в протилежних напрямках по одних і тих же рейкових лініях.

3.2. Використання мереж Петрі в організації маневрової роботи станції

У теперішній час МП використовуються для моделювання однорідних і односпрямованих процесів.

ПП у загальному вигляді складні і неоднорідні (необхідно враховувати вагонопотоки, пасажиропотоки, види вантажу, витрати енергії, ма-

неврові пересування РО при формуванні поїздів й ін.), на них впливає значне число змінних оточення. Для підвищення продуктивності процесу моделювання доцільно використовувати ситуаційні (чіткі й нечіткі) часові квазідвонаправлені МП, які спростять моделі систем.

МП дозволяють моделювати різні етапи й технологічні операції, які являють собою дискретні події. Тому їхнє застосування відповідає завданням моделювання, які вимагають врахування динамічного характеру технологічних процесів рейкового транспорту.

До переваг апарату МП можна віднести наступне [137,140]:

можливість моделювання асинхронних, незалежних паралельних процесів з наявністю конфліктних ситуацій;

більша виразність моделей МП у порівнянні з кінцевими автоматами; використання властивостей ряду інших моделей (семафори Дейкстри, системи векторного додавання й заміщення, обчислювальні схеми й т.д.), що дозволяє описувати як типові ситуації (розподіл ресурсів, взаємні блокування), так і загальну динаміку роботи складної дискретно-подійної системи;

здатність урахувати такі фактори, як пріоритетність процесів (мережі з перевіркою на нуль, пріоритетні мережі), часові параметри подій (мережі Мерліна, часові мережі), спільне відображення структури керування й потоків даних (E-мережі), невизначеність початкової інформації (нечіткі СП);

можливість довільної інтерпретації елементів моделі за їхнім типом і рівнем абстракції, тобто виконання ієрархічної деталізації підсистем.

Класифікація мереж Петрі. Досвід застосування класичних МП привів до розроблення їхніх підкласів, що дозволяють найбільш ефективно використовувати апарат цих мереж для моделювання складних систем. У табл. 3.2 дано огляд основних підкласів МП [137, 153].

Таблиця 3.2

Основні підкласи мереж Петрі

Підклас мережі Петрі	Характерна властивість
Мережі, вільні від конфліктів	Позиція, що належить до підмножини вхідних позицій, належить і до підмножини вихідних позицій даного переходу, інакше вона повинна мати не більше однієї вихідної дуги
Автоматні графи	Кожний з переходів повинен мати одну вхідну й одну вихідну дугу
Регулярні мережі	Завдяки введенню опису таких операцій, як накладення, розмітка, злиття, ітерація та ін., можна подати регулярну мережу в лінійному формульному записі
Мережі вільного вибору	Кожна вихідна дуга позиції є її єдиним виходом або входом переходу
Стійкі мережі	Передбачається, що при збудженні декількох переходів спрацьовування одного з них не виключає можливості спрацьовування іншого

Таблиця 3.3

Основні відомі розширення апарата класичних МП

Розширення мереж Петрі	Короткий опис
Узагальнені мережі	Допускають наявність декількох дуг між позиціями й переходами або використання дуг з ваговими характеристиками
E –мережі	Дозволяють моделювати операції над даними, здійснювані в системі, відбиваючи залежність процесу від типу й ознак завдання
Пріоритетні мережі	Дають можливість урахувати в моделі пріоритетність подій
Мережі Мерліна	Відбивають часові характеристики подій, що відбуваються в модельованій системі
Розфарбовані мережі	Наявність множини розфарбувань міток і дуг дозволяє зменшити розмірність графа при моделюванні складних систем і враховувати пріоритети

Теорія класичних МП містить у собі кілька розширень, що дозволяють підвищити моделюючі можливості [137, 154]. Деякі розширення, які набули найбільшого використання, подані в табл. 3.3.

Теорія класичних МП містить у собі кілька розширень, що дозволяють підвищити моделюючі можливості [137, 154]. Деякі розширення, які набули найбільшого використання, подані в табл. 3.3.

3.3. Формалізація мови квазідвонаправлених мереж Петрі

Грамматика МП складається із трьох основних складових: мови, синтаксису й семантики. В МП дуги відображаються стрілками, що вказують напрямок руху фішок, причому дуга, яка виходить із позиції P_i , повинна завжди входити в перехід V_J , а дуга, що виходить із переходу V_J , повинна входити в позицію $P_{i+\eta}$ ($\eta = \overline{1, \eta_1}$) (з'єднання позицій або переходів між собою дугами заборонене). Дуги можуть мати цілочислову вагу й колір або описуватися нечіткими числами або множинами. Дуги, що входять у переходи V_J з позиції P_i , відображаються як $k_i c_i(P_i, V_J)$, де k_i – вага дуг ($k_i = \overline{1, \eta_2}$), c_i – їхній колір ($c_i = \overline{1, p}$), а дуги, вихідні з переходів V_J у позицію $P_{i+\eta}$, відображаються як $k_{i+\eta} c_{i+\eta}(V_J, P_{i+\eta})$, де $k_{i+\eta}$ – вага дуг ($k_{i+\eta} = \overline{1, \eta_3}$), $c_{i+\eta}$ – їхній колір ($c_{i+\eta} = \overline{1, r}$). Сукупність (множина) дуг, які входять у перехід V_J , відображається як $kc(P_i, V_J)$, а вихідні з переходу V_J – як $kc(V_J, P_{i+\eta})$.

Таке подання характерно для односпрямованого переміщення фішок через перехід V_J . Для організації руху фішок через перехід V_J у зворотному напрямку з позиції $P_{i+\eta}$ у позицію P_i введемо такі позначення [157, 158]: дуги, що входять у переходи V_J з позиції $P_{i+\eta}$, позначимо як $skc(V_J, P_{i+\eta}) = kc(V_J, P_{i+\eta})$, а дуги, вихідні з переходів V_J у позицію P_i , як $skc(V_J, P_{i+\eta}) = -kc(V_J, P_i)$, де $s=+1$ відповідає переміщенню фішок через перехід V_J в одному напрямку, а $s=-1$ – у протилежному. Уведемо статичні

коефіцієнти передачі переходу в прямому напрямку $K_j = \frac{k_{i+\eta}}{k_i}$ й
 $-K_j = -\frac{k_i}{k_{i+\eta}}$ —у зворотному напрямку.

У МП використовується два види дуг: прості й стримуючі, причому останнім, як правило, може надаватися цілочислова вага, що розширює функції моделі. Позиції P_i й переходи V_j з'єднуються в орієнтований біграф – МП, використовуються конвеєрні або транспортні дуги [157], які можуть бути навантажені кольором. Наприклад, на рис. 3.1,а, 3.1,б показані транспортні дуги з кольором kc , на рис. 3.1,в –конвеєрні дуги з кольором kc , а на рис. 3.1,г –стримуюча й транспортна дуги.

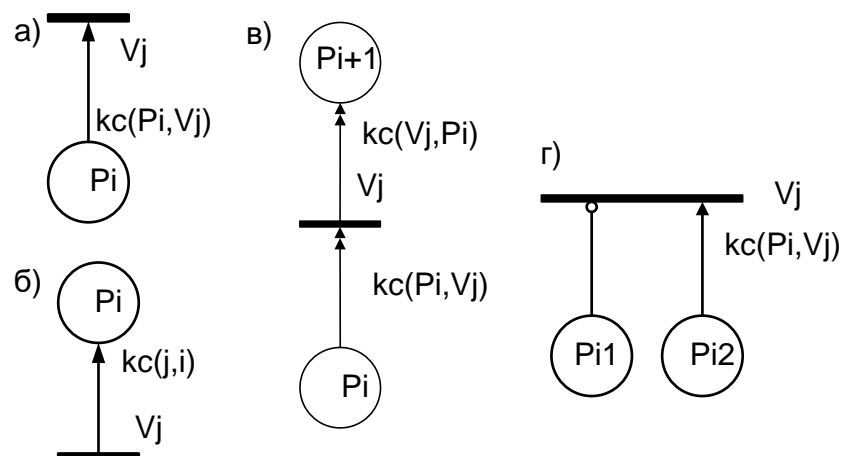


Рис. 3.1. Прості односпрямовані мережі: а) підмережа 1–го роду із транспортною дугою; б) підмережа 2–го роду з транспортною дугою; в) елементарна мережа з конвеєрними дугами; г) підмережа зі стримуючими й транспортною дугами

Введення розширення *квazидвонаправленості* [157,158] дозволяє позиції P_i , P_{i+1} і переходи V_j з'єднати у квazидвонаправлений біграф, наведений на рис.3.2.

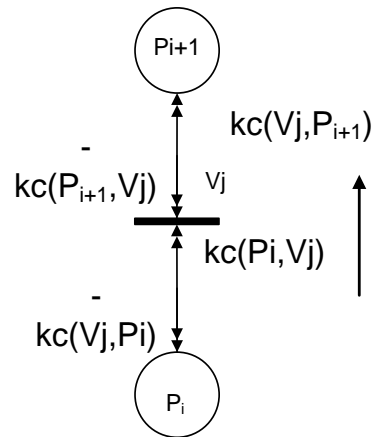


Рис. 3.2. Квазідвонаправлений біграф (стрілкою показаний початковий напрямок руху)

Об'єднання підмереж, показанх на рис. 3.1 і 3.2, дає можливість будувати складні мережі.

Нове розширення –квазідвонаправленість –показане на рис. 3.3 у вигляді двонаправлених конвеєрних і транспортних дуг.

Якщо подати складові 1...6 МП (рис. 3.3), як множини відповідних елементів, то формально визначимо структури МП. Об'єднання підмереж 1-го й 2-го роду: $N_1 = \{P_i, V_j, SKC(P_i, V_j)\}$, $N_2 = \{P_i, V_j, SKC(V_j, P_i)\}$; $N = \{N_1, N_2\}$ (N_1, N_2 –підмережі 1-го й 2-го роду, відповідно, P_i, V_j –множини позицій і переходів). МП може бути формально записана у вигляді четвірки

$$N_n = N_1 \cup N_2 = \{P_i, V_j, SKC(P_i, V_j)\} \cup \{P_i, V_j, SKC(V_j, P_i)\} = \\ = \{P_i, V_j, SKC(P_i, V_j), SKC(V_j, P_i)\}.$$

(3.1)

Створювані моделі вимагають для свого функціонування наявності ресурсів (у МП під ресурсом маються на увазі фінанси, вантажі, контейнери, відчепи, РО, локомотиви, вагони, поїзди, трамваї, витрати енергії і т.п.). Мова МП дозволяє ввести в структуру N_n початковий ресурс у вигляді вектора початкової розмітки M_{i0} . Повністю певна МП –це структура N_n разом з ресурсом m . Відповідний формальний запис N_p (п'ятірка) виникає після доповнення N_n вектором M_{i0}

$$N_p = \{S_n, M_{i0}\} = \{P_i, V_j, KC(P_i, V_j), KC(V_j, P_i), M_{i0}\}, \quad (3.2)$$

де M_{i0} –початковий розподіл ресурсу в множині позицій $\{P_i\}$, поіменований вектором початкового маркування, а N_p –маркірована МП.

Використовуючи поняття теорії графів, можна сказати, що підмережа 1–го роду моделює ступінь напіввходу, а підмережа 2–го роду –ступінь напіввиходу. Об'єднання трьох елементів прагматики (позиції, переходи й дуги) уже можна розглядати як самостійний прагматичний елемент або образ, що буде характеризувати МП як мову, яка, подібно до інших мов [137], має властивості комунікабельності й інтелектуальності. Використання всього двох відзначених підмереж при побудові графа Петрі доцільно при синтезі (включаючи графічні побудови) моделей технологічних процесів на ПЕОМ.

В удосконаленій тут прагматиці в множині дуг $SKC(P_i, V_j)$ наявні дуги трех видів: транспортні (відображаються відрізком зі стрілкою на кінці $P_i \rightarrow V_j$, $P_i \leftarrow V_j$, причому напрямок і вага разом з кольором задається як $skc(P_i, V_j)$); стримуючі дуги з вагою (відображаються відрізком з порожнім кружечком на кінці $P_i \text{---} \bigcirc V_j$ разом з вагою й кольором ($kc(P_i, V_j)$); конвеєрні, їх графічно представимо відрізком з подвійною стрілкою на кінці $P_i \rightleftarrows V_j$. Конвеєрні дуги виконують операції цілочисельного вирахування міток з позиції, а також їхнє додавання в напрямку орієнтованої кольорової дуги (до позиції, на яку вказує стрілка дуги). У МП мітки (фішки) можуть накопичуватися в позиціях або залишати їх, відображаючи наявність ресурсу, що знаходиться в позиціях структури N_n .



а)

б)

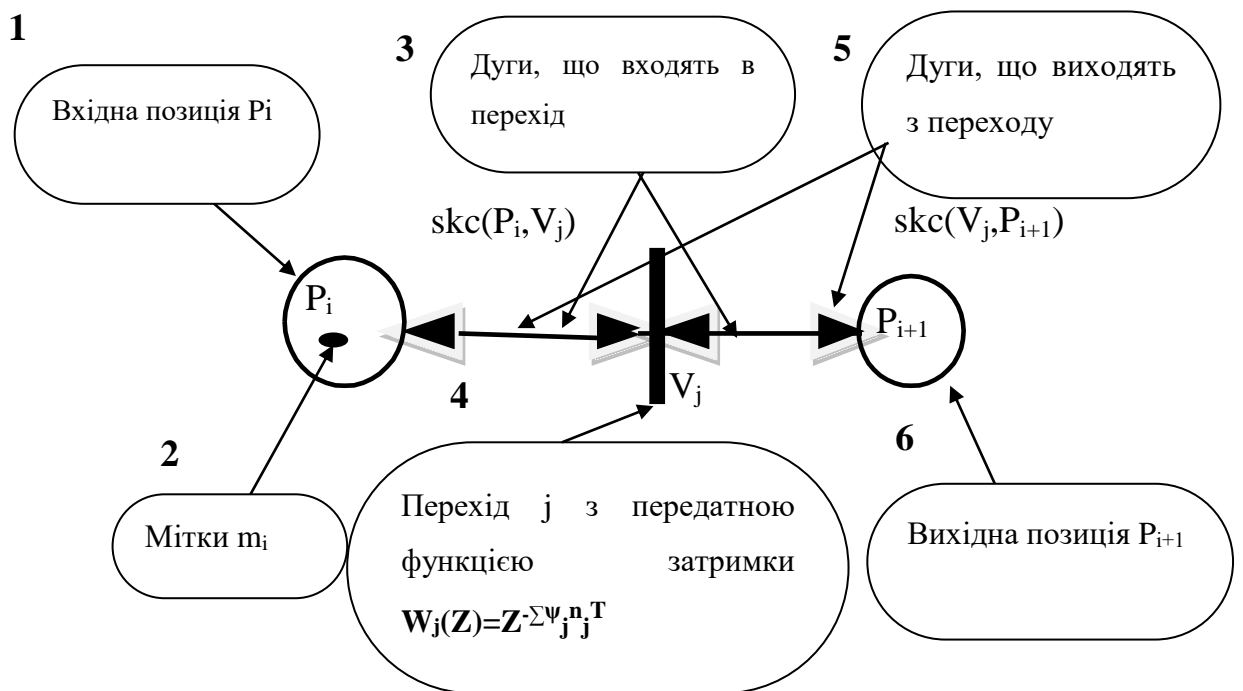


Рис. 3.3. Мережі Петрі: а) із квазідвонаправленими конверсними дугами; б) із квазідвонаправленими транспортними дугами

Маркування мережі змінюється тільки при відкритті певних переходів. Перехід V_J маркірує МП N_p з поточним маркуванням M_{i0} і є відкритим, якщо:

для всіх вхідних позицій P_i , з'єднаних з переходом V_J транспортними дугами, виконується умова

$$KC(P_i, V_J) \leq M_{i0}(P_i), \quad (3.3)$$

де $KC(P_i, V_J)$ – число всіх дуг, які входять у перехід V_J ; $M_{i0}(P_i)$ – число міток у позиціях, пов'язаних з переходом V_J . Тобто в кожній вхідній позиції повинно знаходитись не менше міток, ніж із цієї позиції виходить транспортних дуг у перехід;

для всіх вхідних позицій, з'єднаних із вхідним переходом одиничними інгібіторними дугами, виконується умова

$$M_{i0}(P_i) = 0, \quad (3.4)$$

тобто цей перехід відкритий, якщо всі вхідні позиції дуг порожні.

У результаті відкриття переходу V_J зображення маркування мережі $M_{i0}(P_i, Z)$ змінюється на нове зображення маркування $M_{i\psi}(P_i, Z)$ за правилом

$$M_{i\psi}(P_i, Z) = M_{i0}(P_i, Z) + \{KC(P_i, V_J) - KC(V_J, P_i)\} W_j(Z) \psi(P_i, Z), \quad (3.5)$$

де $\psi = \overline{0, k}$ – число спрацьовувань переходів, $M_{i\psi}(P_i, Z)$ – нове ψ -значення розмітки мережі, $KC(P_i, V_J)$ – число транспортних дуг, що входять у відкритий перехід V_J з позиції P_i , $KC(V_J, P_i)$ – число дуг, що входять у позицію P_i з інших переходів, $W_j(Z)$ – дискретна Z -передатна функція V_J переходу, що відображає динаміку роботи МП (зміна маркування в часі).

При відкритті переходу V_J з позиції P_i , пов'язаної із цим переходом, вилучається стільки міток, скільки транспортних дуг веде з позиції P_i до переходу V_J , але тільки в тому випадку, якщо перехід відкритий по всіх дугах, а в кожену позицію P_i , пов'язану із цим переходом, додається стільки міток, скільки дуг веде з переходу V_J в інші позиції або до неї.

Таким чином, функціонування МП являє собою послідовність відкриття переходів і пов'язану із цим зміну розміток мережі. Цей процес називається виконанням МП.

Як показано в [136,158], для опису МП зручно використовувати математичний апарат теорії матриць. При цьому:

нумеруються всі позиції графа;

нумеруються всі переходи в послідовності виходячи з їхнього пріоритету;

уводяться матриці K_{ij} (для опису дуг, які виходять із позицій P_i , з урахуванням кольору); K_{ji} (для опису дуг, які виходять із переходу V_j , з урахуванням кольору); M_0 (для опису початкового розподілу ресурсу – міток) по всіх позиціях.

Нижче розглянутий приклад застосування класичної односпрямованої МП.

Класичні МП включають чотири складові, що визначають її структуру: множини позицій P_i , множини переходів V_j , а також пов'язаних з ними вхідної і вихідної функцій $I(V_j)$ і $O(V_j)$.

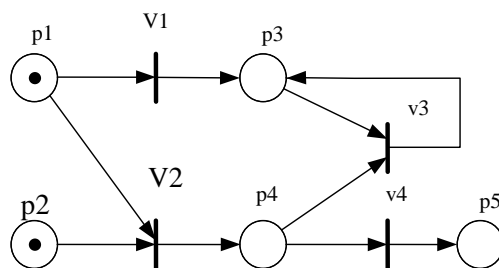


Рис. 3.4. Маркірована мережа Петрі

Наприклад, для мережі рис.3.4 маємо четвірку об'єктів

$$PN = (P_i, V_j, I, O), \quad (3.6)$$

де $P_i = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$ – кінцева множина позицій,

$V_j = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ —кінцева множина переходів;

$I(v_1) = \{p_1\}; O(v_1) = \{p_3\};$

$I(v_2) = \{p_1, p_2\}; O(v_2) = \{p_4\};$

$I(v_3) = \{p_3, p_4\}; O(v_3) = \{p_3\};$

$I(v_4) = \{p_4\}; O(v_4) = \{p_5\},$

$I(v_j), O(v_j)$ – відповідно вхідна й вихідна функції інцидентності переходів з позиціями.

Вищезгаданне визначення МП відбиває статику модельованої системи (взаємозв'язок подій і умов). Надання динамічних властивостей може бути виконане шляхом розширення МП за рахунок введення функцій тривалості проміжку часу T_j спрацьовування переходу V_j , функції числа $\Psi(J)$ дозволених спрацьовувань переходів V_j , функції розмітки (маркування), тобто присвоєння деякого числа фішок (маркерів) позиціям мережі, кількість і положення яких при виконанні МП може змінюватися. Додавання п'ятих, шостих і сьомого структурних елементів може бути описано виразом, що характеризує формалізм динамічної маркірованої МП і являє собою сімку об'єктів

$$PN_M = (P_i, V_j, I, O, T_j, \Psi(J), M_0), \quad (3.7)$$

де $T_j = \{t_1, t_2, \dots, t_q\}$, при цьому компонент $t_{j,k} = \{t_{j,1}; t_{j,2}; \dots; t_{j,q}\}$ відповідає тривалості k -го циклу спрацьовування переходу V_j із числа $\Psi(J)$ дозволених до спрацьовування запусків переходів V_j у момент часу $t_{j,k}$;

$M_0 = \{m_1^0, m_2^0, \dots, m_n^0\}$ – вектор початкової розмітки, при цьому компонент m_i^0 відповідає певній позиції $p_i \in P$, $m_i^0 \in N$, а $m_i = \overline{1, n}$.

Розглянемо як приклад мережу на рис. 3.4, початкова розмітка якої визначена вектором $M_0 = (1, 1, 0, 0, 0)$.

Для комп'ютерної реалізації можна використовувати п'ятірку об'єктів (P, V, D^-, D^+, D) . Для матриць інцидентності $D^-, D^+, i D$ можна записати

$$D^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \quad D^+ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

D і D^+ – матриці інцидентності, що являють відповідно вхідну й вихідну функції зв'язку позицій з переходами відповідними дугами;

$D = D^+ - D^-$ – складова матриця динаміки зміни маркірування позицій при спрацьовуванні відповідних переходів.

Функція зміни поточного маркірування, що має місце при функціонуванні МП, така:

$$M_{t+1}(I) = M_t(I) + \psi(J) \cdot D, \quad (3.9)$$

де M_t – вектор початкової розмітки, у нашому випадку $M_0 = (1, 1, 0, 0, 0)$ (для $t=0$);

$\Psi(J) = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_q)$ – вектор числа циклів запусків, дозволених до спрацьовування переходів V_j у момент часу t , $J = \overline{1, q}$ – номер переходів.

У нашому прикладі $\Psi(J) = (1, 0, 0, 0, 0)$.

Тоді результатом наступного кроку $t+1$ роботи МП буде таке маркірування:

$$M_{t+1} = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0) +$$

$$+ (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} =$$

$$= (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0) + (-1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0) = (0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0).$$

Для моделювання маневрової роботи ставиться завдання синтезу МП із визначенням мінімально можливого числа ($\Psi(J)$) і напрямку (знак S_j) спрацьовувань переходів.

Розглянемо приклад функціонування односпрямованої МП, схема якої наведена на рис. 3.5.

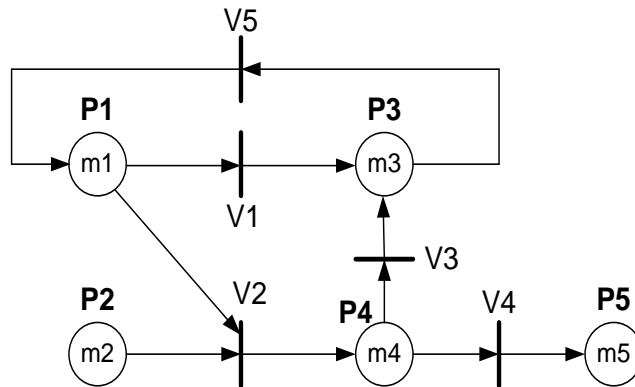


Рис.3.5. Приклад односпрямованої МП

Матриця масиву дуг K_{ij} наведена в табл. 3.4 і описує масив дуг; перший стовпець указує номер позиції, з якої виходить дуга, другий стовпець – номер переходу, у який входить дуга, третій стовпець – вага дуги (колір дугам може встановлюватися якщо є потреба).

Таблиця 3.4

Матриця масиву дуг K_{ij}

K_{ij}	Номер позиції P_i	Номер переходу V_j	Вага дуги
	1	1	1
	1	2	1
	2	2	1
	3	1	1
	4	4	1
	4	3	1
	5	Вихід	1

Аналогічно в табл 3.5 подана матриця K_{ji} , у якій описані дуги, що з'єднують переходи $V_j = \{V_1, V_2, \dots, V_j\}$ з позиціями.

Таблиця 3.5

Матриця масиву дуг K_{ji}

$K_{ji} =$	Номер переходу P_l	Номер позиції V_j	Вага дуги
	1	3	1
	2	4	1
	3	2	1
	4	5	1
	5	3	1

Далі запишемо вектор початкової розмітки (маркування) стану позицій, у яких можуть розміщатися, наприклад, кольорові мітки (різний ресурс). У круглих дужках на першій позиції вказуємо колір, а на другій – ресурс (кількість міток).

$$M_0 = \{(0, 3), (0, 5), (0, 2)\} \quad (3.10)$$

Відповідно до табл. 3.4 і 3.5 на декартових добутках $I*J$ і $J*I$ будемо матриці інцидентності $I(IJ)=I*J$, що описує зв'язок дугами K_{ij} відповідних позицій з переходами, а також $O(JI)=J*I$, що описує зв'язок дугами K_{ji} переходів з позиціями

$$I(IJ) = \begin{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \end{matrix} & \end{matrix}, \quad O(JI) = \begin{matrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \end{matrix} & \end{matrix}. \quad (3.11)$$

Складемо матрицю $D=C(IJ)$ інцидентній зміні розміток позицій МП при спрацюванні кожного з переходів. Ця матриця складається з матриць інцидентності $I(IJ)$ і $O(JI)$ за такою формулою:

$$D=C(IJ)=O(JI)-I(IJ).$$

У кожній позиції C_{ij} цієї матриці буде мати місце результат обчислення різниці значень числа маркерів, записаних у клітках матриць $O(JI)$ і $I(IJ)$ з однаковими індексами. Фактично матриця $C(IJ)$ показує кількість маркерів, які вилучаються із зазначених позицій і додаються у відповідні позиції при спрацюванні кожного з переходів.

$$D = C(IJ) = \begin{matrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} \\ V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 \end{matrix}$$

В СК РТ напрямок руху РО при виконанні маневрових робіт може бути двонаправленим. Наприклад, це має місце при організації руху по однокільних ділянках залізничного транспорту, рейкового транспорту міст, метрополітенів, при організації маневрового руху на залізничних станціях і т.п. Для випадку двонаправленого руху введемо матричне рівняння

$$M_k(I,Z) = M_0 + C(IJ) * S\Psi_j, \quad (3.12)$$

де $S\Psi_j$ – вектор–стовпець мінімально можливої кількості циклів ψ_j і напрямку (знак S) спрацювань кожного з V_j переходів; M_k – розмітка на циклі $k = \overline{1, \psi_j}$.

З (3.12) легко отримати вектор мінімального числа й напрямку спрацювань кожного з переходів за формулою

$$S\Psi_j = (M_k(I,Z) - M_0) * C(IJ)^{-1}. \quad (3.13)$$

Складемо матричне рівняння

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & =1 \\ 0 & 1 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s\psi_1 \\ s\psi_2 \\ s\psi_3 \\ s\psi_4 \\ s\psi_5 \end{bmatrix}. \quad (3.14)$$

Розв'язуючи це рівняння, знаходимо мінімальне число спрацювань відповідних переходів: $s\psi_1=0$, $s\psi_2=5$, $s\psi_3=0$, $s\psi_4=5$, $s\psi_5= s\psi_1+2=2$. Сума спрацювань всіх переходів дорівнює 12. Всі напрямки переміщення маркерів – позитивні, тому що всі знаки позитивні ($s_j=+1$), тобто маркери переміщуються в одному напрямку.

Уведемо квазідвонаправлений перехід [158], що дозволяє з'єднати позиції P_i , P_{i+1} і перехід V_j у квазідвонаправлений біграф, наведений на рис.3.4,*а*. Змінимо структуру МП, виключивши перехід V_5 , і введемо квазідвонаправлені переходи V_1 , V_2 і V_3 , як показано на рис. 3.4,*б*.

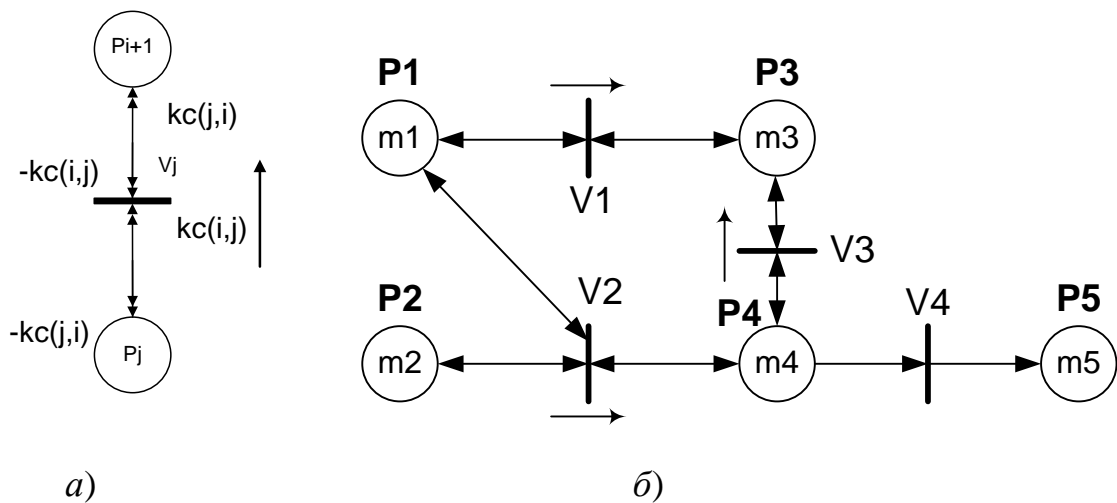


Рис.3.4. Квазідвонаправлена МП: а) біграф; б)приклад мережі

Матриці інцидентності для мережі рис. 3.4,*б* мають вигляд

$$I(IJ) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} \quad O(JI) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{matrix} \quad (3.15)$$

$V_1 \quad V_2 \quad V_3 \quad V_4 \qquad P_1 \quad P_2 \quad P_3 \quad P_4 \quad P_5$

На основі матриць (3.15) складемо матрицю D^- «вилучень» маркерів з позицій P_i при спрацьовуванні відповідних переходів V_j і матрицю D^+ «додавань» маркерів у позиції P_{i+1} при спрацьовуванні відповідних переходів V_j .

$$D^-(IJ) = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} \quad D^+(IJ) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} \quad (3.16)$$

$V_1 \quad V_2 \quad V_3 \quad V_4 \qquad V_1 \quad V_2 \quad V_3 \quad V_4$

Тоді матриця динаміки спрацьовування МП дорівнює

$$D = C(IJ) = D^+ + D^- = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{matrix} \quad (3.17)$$

$V_1 \quad V_2 \quad V_3 \quad V_4$

Склавши матричне рівняння

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \\ 2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} s\psi_1 \\ s\psi_2 \\ s\psi_3 \\ s\psi_4 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

можна одержати його рішення, з якого знаходимо мінімальне число спрацьовувань відповідних переходів: $s\psi_1=-2$, $s\psi_2=5$, $s\psi_3=0$, $s\psi_4=5$. Сума спрацьовувань всіх переходів дорівнює 12. Напрямок спрацьовування переходу V_1 – негативний, тому що $s_1=-1$. У такий спосіб суми спрацьовувань пере-

ходів розглянутої МП однакові, однак число дуг скоротилося на дві, а число переходів -на один, тобто кількість використаних елементів МП скоротилася на 15 %.

Замінімо в МП (рис.3.4, б) напрямок спрацьовування переходу V_1 на протилежний. Схема цієї МП наведена на рис. 3.5.

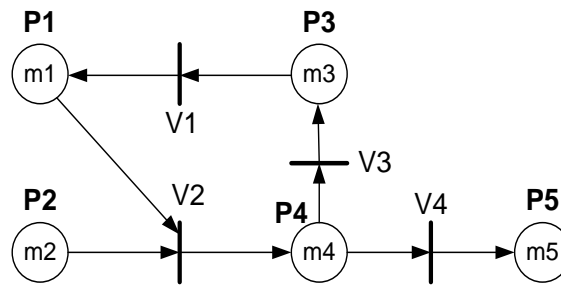


Рис.3.5. МП зі зміненим напрямком спрацьовування переходу V_1

У МП рис. 3.5 всі напрямки спрацьовування переходів позитивні. У цьому можна перекопати шляхом розв'язання матричного рівняння за викладеним методом.

Графік динаміки зміни розміток (ситуацій) $M_{j,k}$ у часі зображений на рис. 3.6. Цей графік показує логіко-динамічний процес зміни розміток МП.

Дискретна апроксимація за допомогою дискретного Z -перетворення Лапласа дозволить одержати передатні функції затримки спрацьовування переходів у вигляді добутку операторів часу затримки спрацьовування кожного з V_j переходів. Цей добуток обумовлений послідовним характером зміни розміток при переході з однієї позиції в іншу в процесі спрацьовування переходів.

Для рис. 3.5 з урахуванням, наприклад, заданого порядку переміщення маркерів: $s\psi_1=2$, $s\psi_2=5$, $s\psi_3=0$, $s\psi_4=5$, $s\psi_5=9$ одержуємо

$$W_{j,k}(V_j, Z) = Z^{\sum_{k=1}^2 -n_{1,k}} * Z^{\sum_{k=1}^5 -n_{2,k}} * Z^{\sum_{k=1}^5 -n_{4,k}} * Z^{\sum_{k=1}^9 -n_{5,k}}$$

$$\begin{aligned}
 W_{j,k}(V_j, Z) &= W_{1,1}(V_j, Z) * W_{1,2}(V_j, Z) * W_{2,1}(V_j, Z) * \dots * W_{5,9}(V_j, Z) = \\
 &= Z^{-T(n_{1,1} + n_{1,2} + n_{1,3} + n_{1,4} + n_{1,5} + n_{1,6} + n_{1,7} + n_{2,1} + n_{2,2} + n_{2,3} + n_{2,4} + n_{2,5} + n_{4,1} \\
 &+ n_{4,2} + n_{4,3} + n_{4,4} + n_{4,5} + n_{5,1} + n_{5,2} + n_{5,3} + n_{5,4} + n_{5,5} + n_{5,6} + n_{5,7} + n_{5,8} + n_{5,9})}, \quad (3...19)
 \end{aligned}$$

де $t = n_{j,k}T$ – момент часу; j – номер переходу, $n_{j,k}$ – число n_j дискретних тактів T спрацьовувань переходу V_j у циклі $k = \overline{1, \psi_j}$. для розмітки $M_{j,k}$, ($n_{j,1} \neq n_{j,2} \neq \dots \neq n_{j,\psi_j}$).

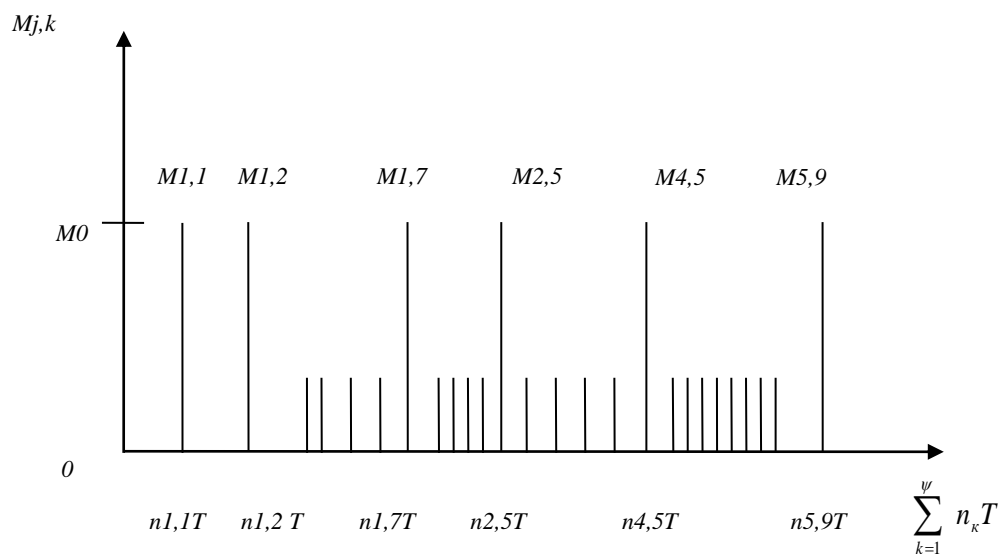


Рис. 3.6. Графік динаміки зміни розміток (ситуацій) у часі для МП

рис. 3.5

Для результуючої МП максимальної продуктивності (рис. 3.5) одержуємо

$$W_{j,k}(V_j, Z) = Z^{-T(n_{1,1} + n_{1,2} + n_{2,1} + n_{2,2} + n_{2,3} + n_{2,4} + n_{2,5} + n_{4,1} + n_{4,2} + n_{4,3} + n_{4,4} + n_{4,5})} \dots \quad (3.20)$$

З використанням операції замикання для цілей структурування мереж синтезована МП рис. 3.5 може бути додана узагальненою схемою, наведеною на рис. 3.7.

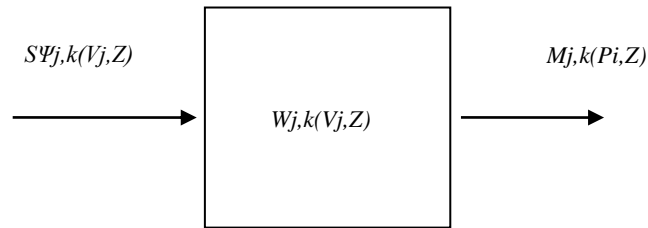


Рис. 3.7. Структурована МП

Z –зображення поточної розмітки позиції P_i при спрацьовуванні переходу V_j на такті k , відповідно, дорівнює

$$M_{j,k}(P_i, Z) = M_0(P_i, Z) + W_{j,k}(V_j, Z) * C(I, J) * S\Psi_{j,k}(P_i, Z), \quad (3.21)$$

зміна зображення поточної розмітки така

$$\begin{aligned} \Delta M_{j,k}(P_i, Z) &= M_{j,k}(P_i, Z) - M_0(P_i, Z) = \\ &= W_{j,k}(V_j, Z) * C(I, J) * S\Psi_{j,k}(P_i, Z), \end{aligned} \quad (3.22)$$

а її оригінал, що являє собою логіко–динамічний процес зміни розміток, щодо поточного моменту часу t , дорівнює

$$\begin{aligned} \Delta M_{j,k}(P_i, t + \sum_{k=1}^{\psi_j} n_{j,k} T) &= M_{j,k}(P_i, t + \sum_{k=1}^{\psi_j} n_{j,k} T) - M_0(P_i, t) = \\ &= W_{j,k}(V_j, t + \sum_{k=1}^{\psi_j} n_{j,k} T) * C(I, J) * S\Psi_{j,k}(P_i, t). \end{aligned} \quad (3.23)$$

Узагальнена процедура моделювання роботи МП показана на рис.3.8.

Блоки 1, 2, 3, 4 реалізуються арифметичними операторами, а 6 – логічним, що вигідно відрізняє МП у порівнянні з булевою алгеброю й полегшує їхнє застосування при моделюванні технологічних процесів.

Отже, розглянуте розширення МП, яке полягає в доповненні існуючих елементів МП новими елементами (спеціальними квазідвонаправленими дугами і їхніми з'єднаннями – рис. 3.4,*a*), уведеними з метою збільшення мовних засобів зображення.

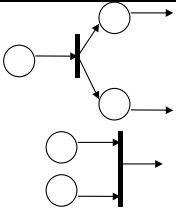
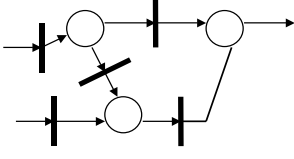
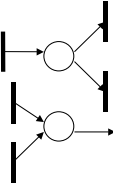
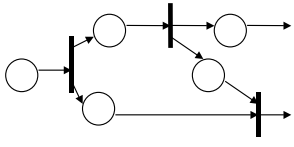
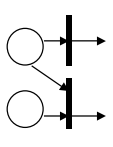
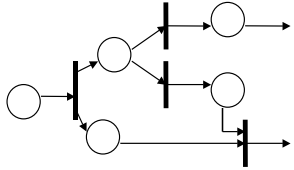
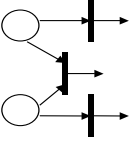
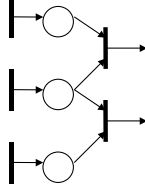


Рис. 3.8. Узагальнена процедура моделювання роботи МП

У табл. 3.6 наведене місце уведеного розширення квазідвонаправленості в класах МП.

Таблиця 3.6

Класи МП і нове розширення квазідвонаправленості

№	Заборонені конфігурації	Дозволені конфігурації	Опис класу МП
1			Автоматні (переходи мають тільки один вхід один вихід)
2			Маркіровані графи (позиції мають тільки один вхід і один вихід)
3			Мережі вільного вибору (поєднують особливості МП по п.п. 1 і 2)
4			Прості (припустима вага дуги тільки 1)
5		З вагою дуг, рівною 1	Ординарні (переходи допускають будь-яке число вхідних дуг і тільки одну вихідну дугу з переходу)
6	Відповідають будь-яким класам по пп. 1–6 цієї Таблиці		Узагальнені (допускають будь-яку конфігурацію)
7	Відповідають будь-яким класам по пп. 1–6 цієї таблиці й містять квазідвонаправлені транспортні й конвеєрні дуги рис. 3, а.		Квазідвонаправлені дискретно–логічні
8	Відповідають будь-яким класам по пп. 1–6 цієї таблиці й містять квазідвонаправлені транспортні й конвеєрні дуги рис. 3, а.		Квазідвонаправлені дискретно–динамічні

Так, наприклад, затримка мітки в часі на будь-яке число кроків моделювання може бути здійснена структурою рис. 3.6, що включає дискретну передатну функцію затримки спрацьовування V_j переходу $W_{j,k}(V_j, Z) = Z^{-\sum n_{j,k}}$ на k тактів дискретного часу $\sum n_{j,k}$.

Отже, квазідвонаправлені МП – це МП, у яких знаки спрацьовування переходів можуть набувати позитивних і негативних значень для прямого й протилежного напрямку переміщення міток. Цілі значення кількості міток у позиції застосовують для чітких чисел, множин чітких чисел і для модальних значень і границь нечітких чисел, а дробові значення кількості міток – для позначення нечітких чисел і множин. Вибраний нами клас МП з новими розширеннями відповідає завданням моделювання технологічних процесів, зокрема зручно відображає просторово розподілені логіко – динамічні системи, до яких відносяться технологічні процеси міського рейкового й залізничного транспорту.

Актуальним є розроблення методів дослідження функціонування систем керування технологічними процесами в умовах невизначеності з використанням МП. При цьому необхідно врахувати такі фактори: наявність великої кількості підсистем зі складними взаємними зв'язками; асинхронність функціонування елементів системи; нечіткий характер поведінки окремих підсистем, змінних і їхніх характеристик.

Перспективним засобом моделювання невизначеності поведінки систем стало подальше розширення МП, засноване на теорії нечітких множин [29, 153]. Прийнято кілька підходів. По-перше, необхідно врахувати невизначеність кількості фішок у позиціях мережі. Другий підхід – використовувати систему продукційного нечіткого висновку при спрацьовуванні переходів, а також нечіткість матриці (3.17) динаміки спрацьовування й тривалості циклів $n_{j,k}$ спрацьовування переходів у часових МП.

3.4. Розроблення розширення – квазідвонаправлені прості й складні функціональні переходи нечітких МП

Нижче викладені нові розширення функціональних переходів нечітких МП для моделювання технологічних процесів на різних видах рейкового транспорту: залізничному, промисловому, та міському, які функціонують в нечіткому середовищі. Такими процесами управляють підсистеми диспетчерського керування параметрами руху РО на полігонах залізниць і маршрутній транспортній мережі міст.

Для ефективного керування важливе розроблення методу моделювання, апарат якого наближений до лінгвістичної природи мислення людини.

Це робить необхідним залучення методів теорії нечітких множин, що допускає неповну визначеність опису об'єкта дослідження й дозволяє врахувати фактори, які впливають на динаміку його функціонування, а саме:

наявність великої кількості підсистем зі складними взаємними зв'язками;

асинхронність функціонування елементів системи;

нечіткий характер поведінки окремих підсистем, змінних і їхніх характеристик.

Класифікація нечітких мереж Петрі (НМП). Нижче розглянуті структури МП із невизначеністю й схема породження конкретних підкласів НМП, що використовують поняття математичної структури просторів з нечіткою мірою. Додаткове включення в схему породження класів математичних структур МП із невизначеністю концепції нечіткої міри дозволяє істотно збагатити одержувані при цьому моделі НМП, збільшити їхні моделюючі можливості й підвищити адекватність при вирішенні практичних завдань.

В основу систематизації класів НМП із невизначеністю покладена концепція породження конкретних математичних структур детермінованих МП шляхом введення в їхні компоненти різних видів невизначеності.

Для ілюстрації цієї ідеї розглянемо схему породження різних класів МП із невизначеністю, утворених з базової математичної структури класу часових МП (ЧМП), що визначається як $\langle C_{PT}, P \rangle$.

Тут $C_{PT}=(N, m_0, z, s)$ – базовий формалізм ЧМП, у якому:

$N=(P, T, I, O)$ – структура ЧМП C_{PT} , що аналогічна структурі узагальнених МП і для якої $I: P \times T \rightarrow \mathbb{N}_0$ – вхідна функція переходів; $O: T \times P \rightarrow \mathbb{N}_0$ – вихідна функція переходів;

$M_0=(m_1^0, m_2^0, \dots, m_n)$ – вектор початкового маркірування, кожний компонент m_i^0 якого являє собою ціле ненегативне число:

$$m_i \in \mathbb{N}_0 (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\});$$

$z=(z_1, z_2, \dots, z_n)$ – вектор часових затримок маркерів у позиціях ЧМП C_{PT} , кожний компонент z_i якого являє собою ціле ненегативне число:

$$z_i \in \mathbb{N}_0 (\forall i \in \{1, 2, \dots, n\});$$

$s=(s_1, s_2, \dots, s_n)$ – вектор часів спрацьовування дозволених переходів ЧМП C_{PT} , кожний компонент s_j якого також являє собою ціле ненегативне число: $s_j \in \mathbb{N}_0 (\forall j \in \{1, 2, \dots, u\});$

P – сукупність Правил $P(C_{PT})$, що визначають процес запуску й функціонування ЧМП, які містять у собі умови активності й спрацьовування переходів, доступності маркерів у позиціях ЧМП, зміни початкового й наступного маркування, а також, можливо, інші умови.

У загальному випадку введення невизначеності в опис вихідної математичної структури (МС) ЧМП $C_{PT} = (N, m_0, z, s)$ припускає задання однієї або декількох структур з невизначеністю $s(\omega)$, що може відбивати стохастичний, нечіткий або комбінований характер її прояву. Послідовно вводя-

чи опис невизначеності $s(\omega)$ в окремі компоненти базової МС $\langle C_{pm}, P \rangle$, можна одержати такі узагальнені класи ЧМП $C_{pm} = (N, m_0, z, s)$ з невизначеністю відповідно до такої схеми породження:

$\langle N(\omega), m_0, z, s, P' \rangle$ –МС ЧМП із невизначеністю задання структури $P' = (P, T, I, O)_\omega$ ЧМП C_{pt} , при цьому P' позначає модифікацію вихідних правил P функціонування ЧМП, що відбивають змістовну сутність введеної невизначеності у структуру ЧМП;

$\langle N, m_0(\omega), z, s, P' \rangle$ –МС ЧМП із невизначеністю задання початкового маркірування M_0 . Конкретизацією даної МС є розглянуті вище НМП V_f при $z=0, s=0$, де $S(\omega)$ визначається аксіоматикою нечіткої міри;

$\langle N, m_0, z(\omega), s(\omega), P' \rangle$ –МС ЧМП із невизначеністю задання часів затримки маркерів у позиціях і часів спрацьовування активних переходів. Дана МС являє собою визначений вище клас ЧМП C_{pm}^f , стосовно до якого $s(\omega)$ визначається аксіоматикою простору з нечіткою мірою;

$\langle N, m_0, z, s, P'(\omega) \rangle$ –МС ЧМП із невизначеністю в заданні правил P , що визначають процес функціонування мережі. Конкретизацією цієї МС є різновиди ЧМП і МП, наприклад, із заданням імовірнісних або нечітких мір на множинах конфліктних переходів з метою виключення альтернативного розгалуження на діаграмі досяжних маркірувань.

Якщо в розглянутій схемі породження МС МП із невизначеністю під $s(\omega)$ розуміти МС з аксіомами нечіткої математики, то отримані подібним чином узагальнення базового формалізму класичних МС природно прийняти за визначення відповідних підкласів нечітких МП, що цілком погодиться з відомими в літературі формальними визначеннями останніх.

І, нарешті, розглядаючи різні комбінації спільного введення опису невизначеності $s(\omega)$ в окремі компоненти базової МС ЧМП і МС інших класів детермінованих МП (наприклад, у МС МП із кольоровими маркерами й дугами, у МС мереж предикат–перехід), а також використовуючи

різні структури $s(\omega)$ стохастичної, нечіткої або комбінованої природи, можна одержати визначення досить багатих у математичному відношенні МС МП різних класів, аналіз властивостей яких може стати предметом самостійних досліджень.

При вивченні підкласів НМП основна увага приділяється не стільки теоретичному аналізу відзначених властивостей НМП, скільки аналізу конкретних нечітких моделей, побудованих на їхній основі. Нижче розглядаються деякі конкретні особливості побудови нечітких моделей на основі підкласів НМП і інтерпретація їхніх властивостей з урахуванням специфіки тої або іншої проблемної області.

Використання нечітких мереж Петрі для подання правил нечітких продукцій. При розв'язанні прикладних завдань нечіткого моделювання використовуються модифіковані НМП $C_f = (N, f, \lambda, m_0)$.

Одним з найбільш відомих додатків НМП є їхнє використання для наочного подання правил нечітких продукцій і виконання на цій основі нечітких висновків.

У цьому випадку використовується наступна інтерпретація позицій і переходів НМП. Правило нечіткої продукції вигляду «ПРАВИЛО i : ЯКЩО A , ТО B » представляється як деякий перехід $v_j \in V$ НМП (N, f, λ, m_0) , при цьому умові A цього правила відповідає вхідна позиція $p_i \in P$ цього переходу v_i , а висновку – вихідна позиція $p_k \in P$ цього переходу v_j (рис. 3.9, а).

Якщо умова правила нечіткої продукції складається з декількох підумов, з'єднаних операцією нечіткої кон'юнкції $\alpha = \alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \dots \wedge \alpha_l$, то всі ці підумови представляються як вхідні позиції відповідного переходу (рис. 3.9, б для випадку $l=3$).

Якщо висновок правила нечіткої продукції складається з декількох підзаключень, з'єднаних операцією нечіткої кон'юнкції $\beta = \beta_1 \wedge \beta_2 \wedge \dots \wedge \beta_l$, то всі ці підзаключення також представляються як вихідні позиції відповідного переходу (рис. 3.9, в для випадку $l=3$).

Більш складний випадок відповідає диз'юнкції підумов і підзаключень. Так, якщо умова правила нечіткої продукції складається з декількох підумов, з'єднаних операцією нечіткої диз'юнкції $\alpha = \alpha_1 V \alpha_2 \dots V \alpha_l$, то всі ці підумови представляються як вхідні позиції окремих переходів v_j для $j \in \{1, 2, \dots, l\}$ (рис. 3.9,а для випадку $l=3$).

Якщо ж висновок правила нечіткої продукції складається з декількох підзаключень, з'єднаних операцією нечіткої диз'юнкції $\beta = \beta_1 V \beta_2 \dots V \beta_l$, то всі ці підзаключення представляються як вихідні позиції окремих переходів v_j для $j \in \{1, 2, \dots, l\}$ (рис. 3.9,б для випадку $l=3$).

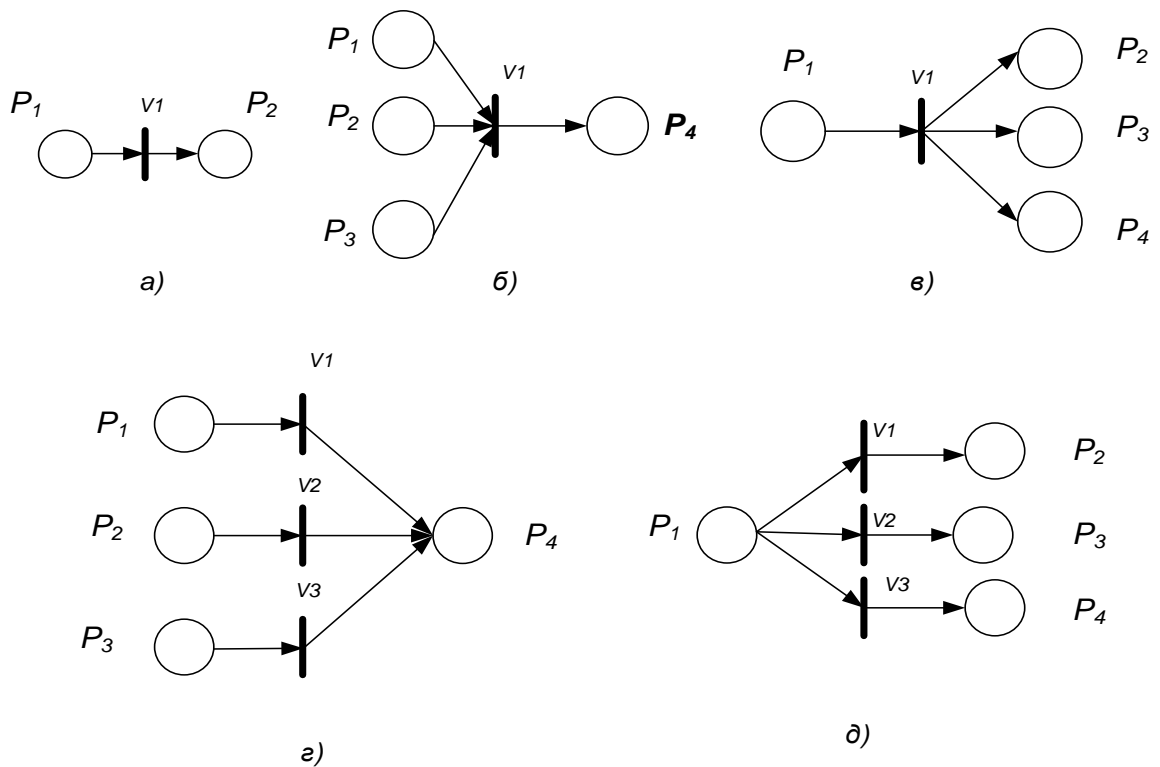


Рис. 3.9. Фрагменти нечітких МП для подання різних варіантів правил нечітких продукцій

Таким чином, будь-яке правило нечіткої продукції може бути подано у вигляді фрагмента НМП. При цьому ваги або коефіцієнти f_i правил нечітких продукцій перетворюються у вектор $f = (f_1, f_2, \dots, f_u)$ значень функцій

приналежності нечіткого спрацьовування переходів, а ступеням істинності підумов правил відповідають значення компонентів початкового маркування $M_0=(m_1^0, m_2^0, \dots, m_n^0)$, що у цьому випадку описує поточну ситуацію при моделюванні.

Основні підкласи нечітких мереж Петрі. В [153] наведена класифікація НМП і нечітких часових мереж Петрі (НЧМП), що фіксує основні компоненти відповідних моделей і дозволяє систематизувати досить широкий клас математичних структур НМП. Тут в основу систематизації класів НМП і НЧМП покладаються детерміновані МП, у різні компоненти яких уводяться різні види невизначеності (нечіткості). Як зазначено в [153, 158, 160], базова математична структура класу ЧМП формується із чотирьох складових, що визначають її структуру елементів:

множина позицій P_i ;

множина переходів V_j , а також пов'язаних з ними вхідної й вихідної функцій $I(V_j)$ і $O(V_j)$;

V_j, P_i – відображуваний перехід і позиція.

Наприклад, для мережі рис. 3.4 маємо четвірку об'єктів, що визначають структуру мережі:

$$PN = (P_i, V_j, I, O), \quad (3.24)$$

де $P_i = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$ –кінцева множина позицій;

$V_j = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ –кінцева множина переходів;

$I(v_1) = \{p_1\}; O(v_1) = \{p_3\};$

$I(v_2) = \{p_1, p_2\}; O(v_2) = \{p_4\};$

$I(v_3) = \{p_3, p_4\}; O(v_3) = \{p_3\};$

$I(v_4) = \{p_4\}; O(v_4) = \{p_5\};$

$I(v_j), O(v_j)$ – відповідно вхідна й вихідна функції інцидентності переходів з позиціями.

Дуже важливою є реалізація динамічних властивостей моделей на основі МП, що може бути виконано шляхом розширення МП за рахунок

введення функції тривалості проміжку часу $t_{j,k}$ спрацьовування переходу V_j , функції числа $\Psi(J)$ дозволених до спрацьовування запусків переходів V_j , функції розмітки (маркування), тобто присвоєння деякого числа фішок (маркерів) позиціям мережі, кількість і положення яких при виконанні МП може змінюватися. Розширимо МП додаванням п'ятого, шостого, сьомого, восьмого, дев'ятого і десятого структурних елементів, що може бути описано виразом, який характеризує формалізм динамічної маркованої МП і являє собою десятку об'єктів.

$$PN_M = (P_i, V_j, I, O, t_{j,k}, Z_i, \lambda, \Psi(J), M_0, \Pi),$$

$$\text{або } PN_M = (PN, t_{j,k}, Z_i, \Psi(J), \lambda, M_0, \Pi), \quad (3.25)$$

де $t_{j,k} = \{t_{j,1}; t_{j,2}; \dots; t_{j,q}\}$, при цьому компонента $t_{j,k}$ відповідає тривалості k – го циклу затримок спрацьовування переходу V_j із числа $\Psi(J)$ дозволених до спрацьовування запусків переходів V_j у момент часу $t_{j,k}$;

z_i – вектор часових затримок спрацьовування маркерів у позиціях P_i ;

λ_j – вектор значень порога спрацьовування переходів;

$M_0 = \{m_1^0, m_2^0, \dots, m_n^0\}$ – вектор початкової розмітки, при цьому компонент m_i^0 відповідає певній позиції $p_i \in P$, $m_i^0 \in N$, а $m_i = \overline{1, n}$;

Π – сукупність правил $\Pi(PN)$, що визначають процес запуску й функціонування ЧМП, які містять у собі умови активності й спрацьовування переходів, доступності маркерів у позиціях ЧМП, зміни початкового й наступного маркувань і інші умови.

Прикладом такої мережі може служити граф, наведений на рис. 3.4, початкова розмітка якого визначена вектором $M_0 = (1, 1, 0, 0, 0)$.

Введенням, відповідно до [153], нечіткості $s(\omega)$ в окремі компоненти базової математичної структури (МС) отримані такі відомі узагальнені класи нечітких НЧМП:

- мережа ЧМП типу МП_Т: $\langle PN(\omega), t_{j,k}, Z_i, \Psi(J), M_0, \Pi \rangle$ – з нечіткістю задання структури, при цьому Π позначає модифікацію вихідних Правил

функціонування Π , що відбивають змістовний зміст уводиться нечеткості, що, у структуру ЧМП;

- ЧМП типу $MPIV_f: \langle PN, t_{j,k}, Z_i, \Psi(J), M_0(\omega), \Pi \rangle$ з нечіткістю задання початкового маркування, де рядки матриці M_0 утворені з векторів m_i^0 , компоненти яких визначають ступінь приналежності $\mu_i(j-1)$ нечіткої відсутності (для нульової компоненти) і нечіткої наявності (для інших компонентів) $j-1$ кількості маркерів у позиції p_i даної НМП.

Наприклад, початкове маркування може бути задане такою матрицею

$$M_0 = \begin{bmatrix} 0,1 & 0,2 & 0,3 & 0 & 0 \\ 0,4 & 0,6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,7 \end{bmatrix}.$$

Тут для позиції p_1 значення $m_{11}^0 = 0.1$ показує, що ступінь приналежності нечіткої відсутності маркерів у даній позиції для початкового маркування дорівнює 0.1. Значення $m_{12}^0 = 0.2$ показує, що ступінь приналежності нечіткої наявності одного маркера в даній позиції для початкового маркування дорівнює 0.2, а $m_{13}^0 = 0.3$ показує, що ступінь приналежності нечіткої наявності двох маркерів у даній позиції для початкового маркування дорівнює 0.3;

- ЧМП типу $MPIV_f: \langle PN, t_{j,k}(\omega), Z_i(\omega), \Psi(J), M_0, \Pi(\omega), \rangle$ з нечіткістю задання часу затримки маркерів у позиціях і часу спрацьовування активних переходів і (або) з невизначеністю в завданні правил, що визначають процес функціонування мережі;

- ЧМП типу MPI_f . У цій мережі вектор початкового маркування $M_i^0 = (m_1^0, m_2^0, m_3^0, m_4^0, m_5^0)$, кожний компонент якого визначається значенням функції приналежності нечіткої наявності одного маркера у відпо-

відній позиції даної НМП. Для зображеного на рис. 3.4 прикладу НЧМП типу $MPTV_f$ вектор початкового маркування $M_i^0 = (0.8, 0.3, 0, 0, 0)$;

- ЧМП типу MPT_f : Узагальнена часова мережа Петрі з кожним компонентом якої $t_{j,k}(\omega)$, $Z_i(\omega)$, $\Psi(J)$, $m(\omega)$, $PI(\omega)$ зв'язаний деякий простір з нечіткою мірою. Математична структура даного класу допускає різні конкретизації на основі конкретних способів задання нечітких мір, наприклад, ЧМП типу MPT_T : Нечіткою часовою мережею цього типу називається підклас НЧМП, кожний компонент вектора початкового маркування якої, вектора параметрів часових затримок маркерів у позиціях і вектора часу спрацьовування дозволених переходів являє собою трикутний нечіткий інтервал (ТНІ) $= \langle a_j, b_j, \alpha_j, \beta_j \rangle_{\Delta}$. Якщо в даному визначенні всі (ТНІ) замінити трикутними нечіткими числами, то виходить нечітка ЧМП типу MPI_{Δ} .

Відомі [153] такі прості функціональні переходи, що входять у структури основних підкласів НЧМП, необхідні для реалізації правил нечітких продукцій і виконання на їхній основі нечітких висновків:

ПЕРЕТИНАННЯ ($A \wedge B \wedge \dots$), ОБ'ЄДНАННЯ ($A \vee B \vee \dots$), СУМА, ДОБУТОК, КОНЦЕНТРУВАННЯ, РОЗТЯГАННЯ, ЗГУЩЕННЯ ($\text{Int}(A)$), РОЗМИВАННЯ ($F(A)$), ОБМЕЖЕННЯ РІВНЯ α нечітких множин і перехід, що реалізує правило нечіткої продукції у вигляді висловлення "ПРАВИЛО i : ЯКЩО A – ТО B ", яке подається як деякий перехід $V_j = \{PN, f, \lambda, M_0\}$. За цієї умови A цьому правилу відповідає вхідна позиція $P_i \in P$ цього переходу, а висновку – вихідна позиція $P_k \in P$ цього переходу.

Тут коефіцієнти f_j перетворюються у вектор $f = \{f_1, f_2, \dots, f_j\}$ нечіткого спрацьовування переходів, а ступеням істинності підумов правил - відповідають компоненти початкового маркування $M_0 = \{m_1^0, m_2^0, \dots, m_n^0\}$, що описує поточну ситуацію моделювання.

Недоліком такого подання нечіткого функціонального переходу є суб'єктивність вибору значень компонентів вектора $f = \{f_1, f_2, \dots, f_j\}$.

Уведемо в структуру відомих НМП нові розширення для функціональних квазідвонаправлених складних переходів [160].

Імплікаційний перехід – ВІДНОШЕННЯ $R_{j,i}(X_{ji} \times Y_{ji})$ між змінними X_{ji} і Y_{ji} , тобто i значень j термів змінної X_{ji} у фазифіковані значення відповідних термів відповідних лінгвістичних або нечітких змінних Y_{ji} , що реалізує висловлення ЯКЩО – ТО. За цієї умови ЯКЩО цього правила відповідає множина вхідних позицій $P_{j,i}(X_{ji})$ цього переходу, а висновку ТО – множина вихідних позицій $P_{j,i+1}(Y_{ji})$;

переходи, що реалізують операції:

- КОМПОЗИЦІЯ $F_{комп}$ НЕЧІТКИХ МНОЖИН A та ВІДНОШЕНЬ R_i , тобто $F_{комп} = (A \circ R_i)$;

- КОМПОЗИЦІЯ R_{ij} ВІДНОШЕНЬ R_i і ВІДНОШЕНЬ R_j , тобто ВІДНОШЕНЬ $R_{ij} = (R_i \circ R_j)$ або max–min – згортки;

- ФАЗИФІКАЦІЯ $F_{агр}$ вхідних змінних, яка здійснює агрегування – знаходження ступенів істинності для усіх вхідних термів;

- ДЕФАЗИФІКАЦІЯ вихідних змінних, яка здійснює активізацію $F_{акт}$ підзаключень – знаходження ступенів істинності усіх заключень правил нечітких продукцій (НП) на етапі логічного рішення, й акумуляцію $F_{акк}$ заключень правил НП – знаходження сумарної функції приналежності для всіх лінгвістичних змінних множин правил НП на етапі формування управляючого впливу (наприклад, за запропонованим критерієм упевненості в правильності прийняття рішення).

3.5. Організація обчислень із використанням нових розширень нечітких функціональних переходів

Після введення нових функціональних переходів [160] наведемо приклади їх використання.

Приклад 1. Формування швидкості руху відчепу (РО) на сортувальній станції. Розглянемо операцію композиції нечіткої множини A з

нечітким відношенням R_I . Нехай множині U відповідає нечітка змінна ВІДСТАНЬ до точки гальмування, а множині V – нечітка змінна ШВИДКІСТЬ ГАЛЬМУВАННЯ відчепу. Прийmemo $U=[30, 40, 50, 60]$ м, а $V=[0.3, 0.6, 1.2, 2.40]$ м/с

Уведемо нечіткі змінні:

A – мала ВІДСТАНЬ, прийmemo $A=[(30/1,0); (40/0,8); (50/0,2); (60/0)];$

A' – занадто мала відстань, прийmemo $A'=[(30/1); (40/0,64); (50/0,04); (60/0)];$

U – більша швидкість гальмування, прийmemo $B=[(0.3/0); (0.6/0,1); (1.2/0,8); (2.4/1)].$

D – результат, що відповідає нечіткому висновку Л. Заде, який визначається за таким правилом:

$$D=A' \circ (A \circ B),$$

де \circ – позначення операції композиції між нечіткими змінними.

Уведемо нечітке відношення R , що характеризує нечітке висловлення

“ Якщо ВІДСТАНЬ мала, то ШВИДКІСТЬ ГАЛЬМУВАННЯ більша “

$$R = A \circ B = \begin{array}{cccc} \left[\begin{array}{cccc} 0 & 0,1 & 0,8 & 1,0 \\ 0 & 0,1 & 1,0 & 0,8 \\ 0 & 1,0 & 0,2 & 0,2 \\ 1,0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right. & \begin{array}{l} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \end{array} \\ \left. \begin{array}{cccc} V_1 & V_2 & V_3 & V_4 \end{array} \right] \end{array}$$

Результат гальмування D відповідає нечіткому висновку $\mu_D(V)$ і будується на підставі композиції поточної нечіткої множини A' з відношенням R

$$\mu_D(V)=[1,0; 0.64; 0.04; 0] \circ \begin{bmatrix} 0 & 0,1 & 0,8 & 1 \\ 0 & 0,1 & 1 & 0,8 \\ 0 & 1 & 0,2 & 0,2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = [0; 0,1; 0,8; 1,0]$$

Тут з кожної пари чисел, для яких виконується композиція, вибирається мінімальне число, а із чотирьох підсумкових чисел –максимальне. У такий спосіб результату гальмування D відповідає така нечітка множина:

$$D=[(0.3/0); (0,6/0,1); (1.2/0,8); (2.4/1,0)],$$

дефазифікація якої визначає те, що швидкість гальмування відчепа повинна бути дуже великою і дорівнювати 2.4 м/с.

Приклад 2. Розглянемо композицію двох нечітких відношень $R_1(x \times y) \rightarrow [0,1]$ і $R_2(y \times z) \rightarrow [0,1]$.

Нехай R_1 – нечітке відношення між змінними x та y , а R_2 – нечітке відношення між змінними y та z .

Матриця відношення R_1 , на декартовому добутку x^*y така:

$$R_1 = A \circ B = \begin{matrix} & \begin{matrix} y_1 & y_2 & y_3 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 0,1 & 0,7 & 0,4 \\ 1 & 0,5 & 0 \end{bmatrix} & \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \end{matrix} \end{matrix}$$

Матриця відношення R_2 на декартовому добутку y^*z така:

$$R_2 = \begin{matrix} & \begin{matrix} z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} 0,9 & 0 & 1 & 0,2 \\ 0,3 & 0,6 & 0 & 0,9 \\ 0,1 & 1 & 0 & 0,5 \end{bmatrix} & \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{matrix} \end{matrix}$$

На рис.3.10 наведена схема мережі, що відповідає послідовній композиції матриць відношень R_1 і R_2

Реалізація нових функціональних переходів f_i , F_1 і F_2 за допомогою МП для реалізації цих нечітких відношень наведена на рис. 3.11.

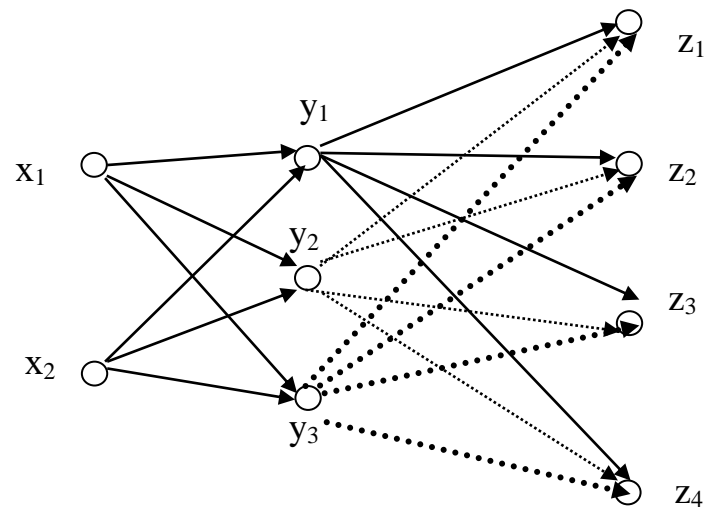


Рис.3.10. Схема мережі для послідовної композиції матриць відношень R_1 і R_2

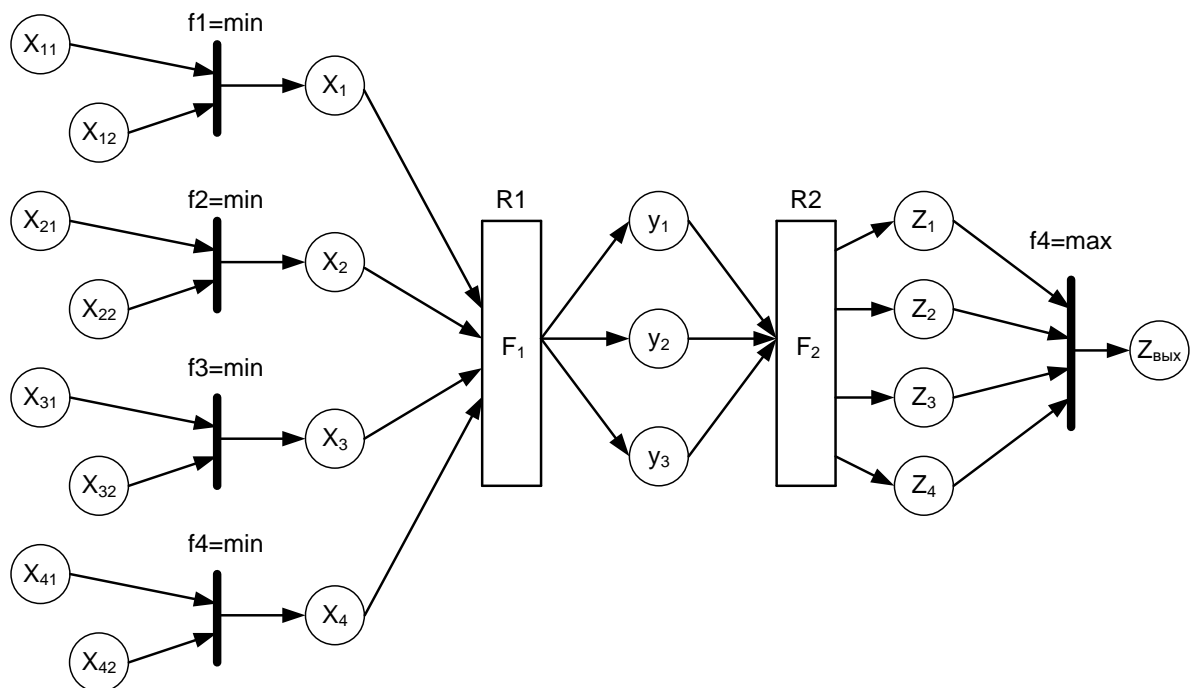


Рис.3.11. МП, що відповідає реалізації функціональних переходів f_i , F_2 і F_3 для послідовної композиції матриць відношень R_1 і R_2

Тут у кожній вхідній позиції $P_{j,i}$ НМП зазначений елемент початкового маркірування m_{ji}^0 , що відповідає фазифікованому значенню відповідного i терму j лінгвістичної або нечіткої змінної X_{ji} у момент часу k .

Необхідно визначити нечітке відношення $R_3=R_1 \circ R_2$ на декартовому добутку x та z , обумовлене як max–min композиція відношень R_1 і R_2 виразом:

$\mu_{R_3}=\mu_{R_1 \cdot R_2}(x, z)=V[\mu_{R_1}(x, y) \wedge \mu_{R_2}(y, z)]$, що є max–min композицією відношень R_1 і R_2 .

Перший елемент матриці $R_3=R_1 \circ R_2$ реалізується в результаті композиції за правилом

$x_1 \circ z_1 = (0,1 \wedge 0,9) \vee (0,7 \wedge 0,3) \vee (0,4 \wedge 0,1) = (0,1; 0,3; 0,1) = 0,3$, а інші – аналогічно.

Матриця відношення R_3 має вигляд

$$R_3 = R_1 R_2 = \begin{matrix} & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0,3 & 0,6 & 0,1 & 0,7 \\ 0,9 & 0,5 & 1 & 0,5 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

На рис.3.12 наведена схема МП, що відповідає матриці відношення R_3 , а на рис.3.13 – схема МП, що відповідає реалізації функціональних переходів f_i і F_3 для композиції $R_3=R_1 \circ R_2$.

Тут у кожній вхідній позиції $P_{j,i}$ НМП зазначений елемент початкового маркування m_{ji}^0 , що відповідає фазифікованому значенню i -го терму X_{ji} j -тої лінгвістичної або нечіткої змінної в момент часу k .

Приклад фазифікації чіткого значення змінної X_j у фазифіковані значення i -тих термів X_{ji} відповідних j -тих лінгвістичних або нечітких змінних наведений на рис. 3.14.

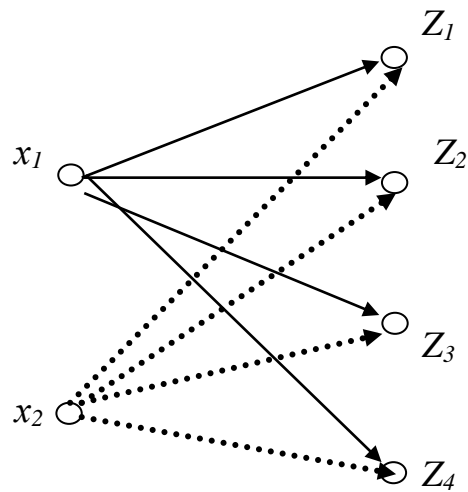


Рис. 3.12. Схема мережі, що відповідає матриці відношення R_3

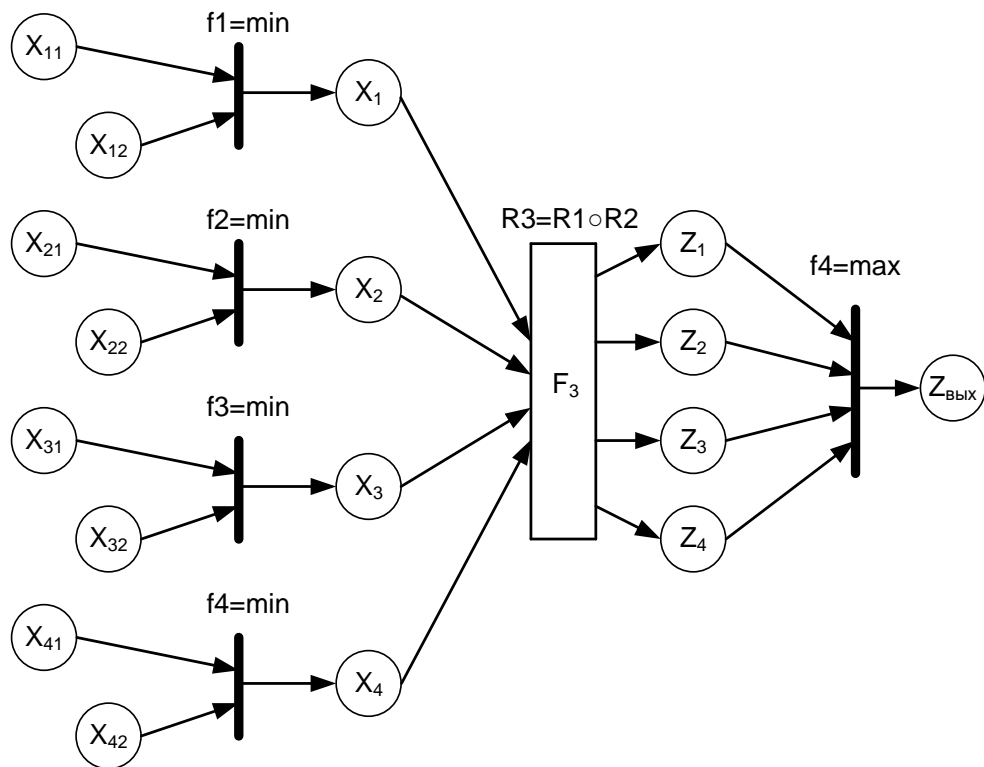


Рис. 3.13. МП, що відповідає реалізації функціональних переходів f_i і F_3 (для матриці відношення $R_3=R_1 \circ R_2$)

Приклад реалізації функціонального переходу –нечітке ВІДНОШЕННЯ між змінними x та y , тобто перетворення значень i -тих термів j -тої змінної X_{ji} у відповідні фазифіковані значення термів Y_{ji} , наведений на рис. 3.15.

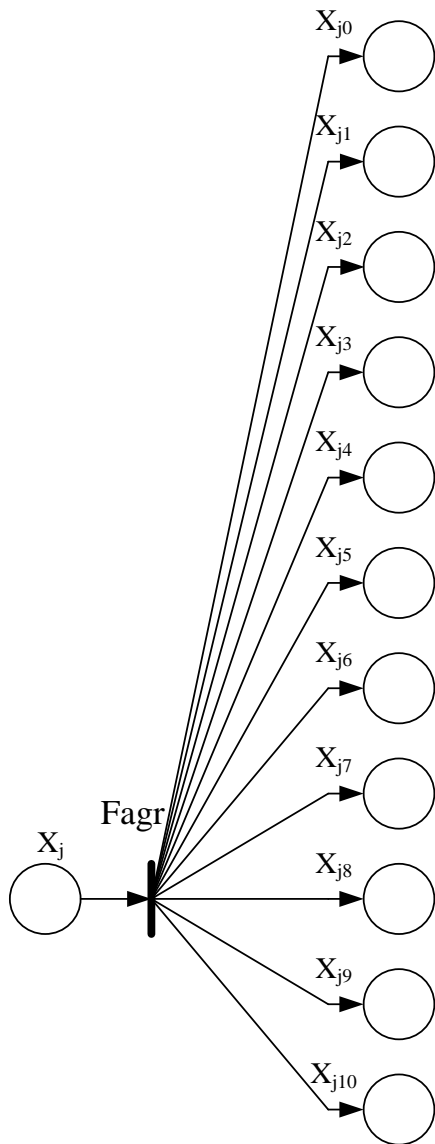


Рис. 3.14. Приклад фазифікації

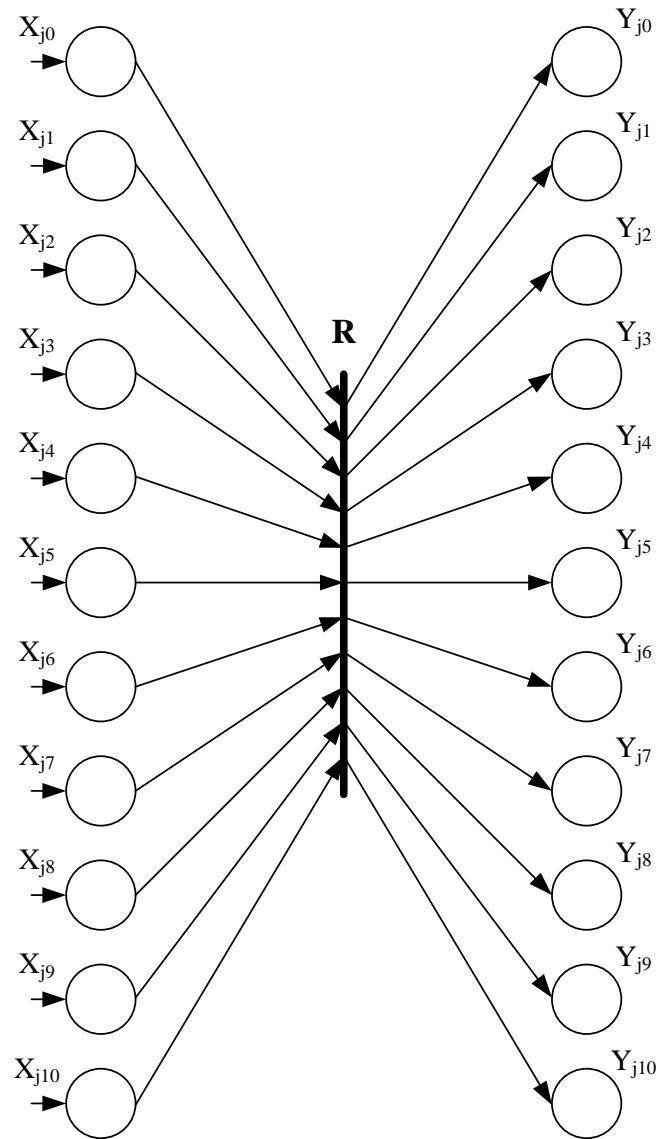


Рис. 3.15. Приклад реалізації функціонального переходу НЕЧІТКЕ ВІДНОШЕННЯ R

Усі системи з нечіткою логікою функціонують за однією ознакою: показання вимірювальних приладів фазифікуються (переводяться в нечіткий формат), обробляються на основі таблиць лінгвістичних правил системи продукційного нечіткого висновку, дефазифікуються й у вигляді вихідних сигналів подаються на виконавчі пристрої.

Приклад 3. Керування швидкістю руху локомотива. За основу реалізації такого керування (на основі побудови його моделі) приймаємо метод визначення лінгвістичної оцінки відхилення кута повороту \tilde{Y} контролера машиніста (КМ) на необхідне число номерів позицій КМ. Будемо використовувати апарат нечіткого логічного висновку. Отримана лінгвістична оцінка зміни числа номерів позицій КМ дозволяє реалізувати відповідний керуючий вплив на тягові двигуни локомотива. Збільшення кута повороту КМ \tilde{Y} на потрібне число номерів позицій КМ необхідно виконувати при негативних відхиленнях і негативних швидкостях відхилень від заданої траєкторії зміни швидкості руху в поточний момент часу. Зменшення кута повороту КМ на потрібне число номерів позицій КМ необхідно виконувати при позитивних відхиленнях і позитивних швидкостях відхилень від заданої траєкторії зміни швидкості руху в поточний момент часу.

У ролі вхідних змінних при визначенні відхилення кута повороту КМ від поточного номера приймаються два параметри:

x_1 – відхилення поточної швидкості руху локомотива від заданої;

x_2 – швидкість відхилення поточної швидкості руху локомотива від заданої швидкості.

З технологічних міркувань приймаємо, що значення цих параметрів можуть перебувати у діапазоні $X_j \in [x_{j \min}, x_{j \max}]$, $j=1,2$.

Вхідні параметри x_j розглядаються як нечіткі множини, що формують лінгвістичні змінні у вигляді трійок:

$$x_j = \{< x_{ji}; U_{xji}; \tilde{x}_j >\};$$

$$x_{ji} \in T_j^x (U_{xji}); j=1,2; i=\overline{0,10};$$

T_j^x – розширена терм–множина лінгвістичної змінної ПАРАМЕТР j ;

\tilde{x}_j – нечітка множина, що описується функцією приналежності $\mu_{\tilde{x}_j}$;

$$U_{xji} – \text{універсум } j=\overline{1,2}; i=\overline{0,10}.$$

Значення U_{xji} лінгвістичної змінної x_j параметра j задається згідно з табл. 3.7.

Таблиця 3.7

Значення лінгвістичної змінної

Найменування терм–множин x_j лінгвістичних змінних ВІДХИЛЕННЯ ПОТОЧНОЇ ШВИДКОСТІ ($j=1$) і ШВИДКІСТЬ ВІДХИЛЕННЯ ($j=2$)	Номер i -тих терм–множин лінгвістичних змінних U_j	Значення U_{ji} i -тих терм–множин лінгвістичних змінних U_j
несуттєве	0	U_{j0}
майже мале	1	U_{j1}
мале	2	U_{j2}
трохи більше, ніж мале	3	U_{j3}
майже середнє	4	U_{j4}
середнє	5	U_{j5}
трохи більше, ніж середнє	6	U_{j6}
майже велике	7	U_{j7}
велике	8	U_{j8}
трохи більше, ніж велике	9	U_{j9}
граничне	10	U_{j10}

У даному прикладі на основі методики [21] приймаємо як відображення $g: x_{ji} \rightarrow U_{xji}$ таке відношення:

$$U_i = \text{ent} \left[\text{card}(U_{x_{ji}} - 1) \frac{x_{ji} - x_{\min ji}}{x_{\max ji} - x_{\min ji}} \right],$$

де ent – оператор визначення цілої частини числа;

$N = \text{card}(U_{x_{ji}} - 1)$ – потужність універсума, яка дорівнює числу ділянок розбивки універсума відповідної змінної;

нечіткі множини виду

$$\tilde{x}_{ji} = \int_{u_{x_{ji}}} \frac{\mu(U_{ji})}{U_{ji}} dU_{ji}.$$

Поточні значення терм-множин лінгвістичних змінних формуються за формулою

$$\mu(U_{ji}) = 1 - \frac{1}{N} \left[U_{ji} - \text{ent} \left[N \frac{X_{ji} - X_{\min ji}}{X_{\max ji} - X_{\min ji}} \right] \right], \quad \text{де}$$

$$\tilde{X}_{ji} = \frac{U_{ji}}{N} (X_{\max ji} - X_{\min ji}) + X_{\max ji}.$$

Фазифіковані значення терм-множин лінгвістичних змінних формуються за формулою

$$\mu(U_{ji}) = 1 - \frac{1}{N} [1 - (i_j - U_{ji})],$$

де $i_j = \overline{0, 10}$ – номер i -того терму j -тої змінної.

Для формування нечіткого відношення R_1 між вхідними змінними x_1 і x_2 та вихідною змінною z , тобто $R_1(\mu_{\tilde{x}}, \mu_{\tilde{y}})$ використовуємо, наприклад, нечітке правило продукції:

$R_1()$ = Якщо \tilde{x}_1 відхилення швидкості руху від заданої НЕСУТТЄВЕ та \tilde{x}_2 відхилення швидкості відхилення БІЛЬШ–МЕНШ НЕСУТТЄВЕ, ТО \tilde{y} НУЛЬОВЕ, ІНАКШЕ \tilde{y} МАКСИМАЛЬНЕ.

Так як змінні x_{10} і x_{20} з погляду даного правила продукції нерівнозначні, тобто при визначенні кута повороту КМ більшого значення набуває відхилення швидкості, ніж швидкість її відхилення, то замість функції

приналежності вигляду $\mu(U) = \mu(U_1) \wedge \mu(U_2)$, дотримуючись принципу виділення за важливістю, використовуємо операцію

$$\mu(U) = \mu(U_1) \wedge \text{DIL } \mu(U_2),$$

або

$$\mu(U) = \mu_1(U) \wedge (\mu_2(U))^{0,5} = ([\bigcap_j \tilde{x}_j] \times V_y \rightarrow U_{xj} \times \tilde{Y}) \wedge (\lceil [\bigcap_j \tilde{x}_j] \times V_y \rightarrow \tilde{U}_x \times \lceil \tilde{Y}).$$

Для лінгвістичної змінної x_{10} значення терм-множини лінгвістичної змінної НЕСУТТЄВЕ визначається виразом

$$\mu_{\tilde{x}_{10}} = \text{НЕСУТТЄВЕ} = 1/0 + 0,9/1 + 0,8/2 + 0,7/3 + 0,6/4 + 0,5/5 + 0,4/6 + 0,3/7 + 0,2/8 + 0,1/9 + 0/10.$$

Для лінгвістичної змінної x_{21} значення терм-множини лінгвістичної змінної БІЛЬШ–МЕНШ НЕСУТТЄВЕ визначаються виразом

$$\text{DIL } \mu_{\tilde{x}_{20}} = \text{БІЛЬШ–МЕНШ НЕСУТТЄВЕ} = (1/0 + 0,9/1 + 0,8/2 + 0,7/3 + 0,6/4 + 0,5/5 + 0,4/6 + 0,3/7 + 0,2/8 + 0,1/9 + 0/10)^{0,5} = 1/0 + 0,95/1 + 0,89/2 + 0,84/3 + 0,78/4 + 0,7/5 + 0,64/6 + 0,55/7 + 0,45/8 + 0,31/9 + 0,31/10.$$

Значення лінгвістичної змінної ВІДХИЛЕННЯ КУТА ПОВОРОТУ КМ \tilde{Y} наведені в табл. 3.8.

Аналогічно описаному вище способу визначаємо множину вихідної змінної КУТ ПОВОРОТУ КМ

$$V_i = \text{ent} \left[\text{card}(V_i - 1) \frac{Y_i - Y_{\min i}}{Y_{\max i} - Y_{\min i}} \right],$$

наприклад,

$$\mu_{\tilde{Y}_0} = \text{НУЛЬОВИЙ КУТ ПОВОРОТУ КМ} = 1 - \frac{1}{10} (Y_{\min} - 10 \frac{Y_i - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}}); Y_{\min} = Y_0,$$

або

$$\mu_{\tilde{Y}_{10}} = \text{МАКСИМАЛЬНИЙ КУТ ПОВОРОТУ КМ} = 1 - \frac{1}{10} (Y_{\max} - 10 \frac{Y_i - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}});$$

$$Y_{\max} = Y_{10},$$

$\mu_{\tilde{y}_{10}} = \text{МАКСИМАЛЬНИЙ КУТ ПОВОРОТУ КМ} = 0/0+0,1/1+0,2/2+0,3/3+0,4/4+0,5/5+0,6/6+0,7/7+0,8/8+0,9/9+1/10.$

Таблиця 3.8

Значення лінгвістичної змінної ВІДХИЛЕННЯ КУТА ПОВОРОТУ КМ

Найменування терм-множини лінгвістичної змінної ВІДХИЛЕННЯ КУТА ПОВОРОТУ КМ	Номер i терм-множини лінгвістичної змінної ВІДХИЛЕННЯ КУТА ПОВОРОТУ КМ	Значення терм-множини лінгвістичної змінної ВІДХИЛЕННЯ КУТА ПОВОРОТУ КМ
Нульове	0	V_0
майже мале	1	V_1
Мале	2	V_2
трохи більше, ніж мале	3	V_3
майже середнє	4	V_4
Середнє	5	V_5
трохи більше, ніж середнє	6	V_6
майже більше	7	V_7
Велике	8	V_8
трохи більше, ніж велике	9	V_9
максимальне	10	V_{10}

Аналогічно можна одержати необхідні значення всіх інших терм-множин.

Нечітке відношення $R_I()$ будемо за таким логічним правилом:

$$R_I() = \begin{cases} 1-\mu(V), & \text{якщо } \mu(U) < \mu(V); \\ 1, & \text{якщо } \mu(U) = \mu(V); \\ \mu(V), & \text{якщо } \mu(U) > \mu(V). \end{cases}$$

Результати нечіткого відношення наведені в табл.3.9, де на декартовому добутку (перетинанні) $U_i \times V_i$ наведені результати операції композиції (\circ) відповідних елементів нечітких множин $\mu(U_i)$ і $\mu(V_i)$.

Поточні значення нечіткої множини вихідної змінної $\tilde{Y}(t)$ – (ПОТОЧНИЙ КУТ ПОВОРОТУ КМ локомотива) – визначаються з композиції поточних фазифікованих значень змінних $\tilde{x}_1(t) \wedge DIL(x_2(t))$ з нечітким відношенням $R_I()$, тобто

$$\mu_{\tilde{Y}}(t) = [\mu_{\tilde{x}_1(t)} \wedge DIL \mu_{\tilde{x}_2(t)}] \circ R_I().$$

Таблиця 3.9

Таблиця результатів нечіткого відношення

	$V_0=$ 1,0	$V_1=$ 0,9	$V_2=$ 0,8	$V_3=$ 0,7	$V_4=$ 0,6	$V_5=$ 0,5	$V_6=$ 0,4	$V_7=$ 0,3	$V_8=$ 0,2	$V_9=$ 0,1	V_{10} =0
$U_0=1$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$U_1=0,9$	0	1	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$U_2=0,8$	0	0,1	1	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$U_3=0,7$	0	0,1	0,2	1	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$U_4=0,6$	0	0,1	0,2	0,3	1	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$U_5=0,5$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	1	0,4	0,3	0,2	0,1	0
$U_6=0,4$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	0,3	0,2	0,1	0
$U_7=0,3$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	1	0,2	0,1	0
$U_8=0,2$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1	0,1	0
$U_9=0,1$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	1	0
$U_{10}=0$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1

Як вихідний параметр для визначення числа номерів позицій КМ, на яке повинен змінитися кут повороту КМ, введемо нечітку множину, що

формує лінгвістичну змінну ВІДХИЛЕННЯ 2, яку можна описати трійкою вигляду:

$$\{V_{jq}(i), \nabla n_{jq}, \tilde{Y}_{ji}\},$$

де $q=0, 1, 2, 3, 4$; $i=0, 1, 2, \dots, 10$; $V_{jq}(i) \in T^*(\nabla n_{jq})$,

де ∇n_{jq} – число номерів позицій КМ, на яке повинен змінитися кут повороту КМ, поданий універсумом вигляду $\nabla n_{jq} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$;

\tilde{Y}_i – нечіткі множини, описані функціями приналежності $\mu(\tilde{Y}_i)$;

$T^*(\nabla n_{jq})$ – розширена терм-множина змінної ВІДХИЛЕННЯ 2.

Для опису відображень $M_q: V_{jq}(i) \rightarrow \nabla n_{jq}$ скористаємося наступними міркуваннями.

Нехай, наприклад, $V_{jq}(i) = V_0$, якщо $i=0, 1$; або V_1 , якщо $i=2, 3$; або V_2 , якщо $i=4, 5, 6$; або V_3 , якщо $i=7, 8$; або V_4 , якщо $i=9, 10$.

Іншими словами, якщо $V_q(i) \rightarrow \nabla n_{jq}$, то значення змінної ВІДХИЛЕННЯ 2, що дорівнює числу номерів позицій КМ ∇n_{jq} , можна подати (табл. 3.10) у такому вигляді: $\nabla n_{jq} \in V_q$.

Поточне значення швидкості РО може дорівнювати заданому, але може й перевищувати чи бути меншим від нього. Керуючий вплив у таких ситуаціях буде різним. Позначимо через X_1 різницю між поточною та заданою швидкістю, а через X_2 – прискорення РО. Якщо РО рухається швидше, ніж треба, а значення прискорення близьке до нуля, то керуючим впливом Δn_1 на РО буде зменшення X_1 за рахунок збільшення прискорення X_2 у від'ємний бік (керуючий вплив Δn_2). Якщо у деякій ситуації прискорення буде не нульовим, а достатньо від'ємним, то додаткових керуючих втручань у поточний момент часу робити не треба.

Таблиця 3.10

Значення змінної ВІДХИЛЕННЯ 2

Нульове	$\nabla n_{j0}=0$, якщо $V_{jq}(i) \in V_0$
Мале	$\nabla n_{j1}=1$, якщо $V_{jq}(i) \in V_1$
Середнє	$\nabla n_{j2}=2$, якщо $V_{jq}(i) \in V_2$
Велике	$\nabla n_{j3}=3$, якщо $V_{jq}(i) \in V_3$
Дуже велике	$\nabla n_{j4}=4$, якщо $V_{jq}(i) \in V_4$

Якщо знаки $signx_j$ для кожної j -тої змінної x_j однакові, то зміна Δn номерів позицій КМ визначається композицією (3.26)

$$\Delta n = -\{(|\Delta n_1| \circ |\Delta n_2|) Sign x_1\}, \quad (3.26)$$

тобто переміщення КМ здійснюється в протилежний бік знаку добутку знаків вхідних змінних.

Якщо знаки $signx_j$ для кожної j -тої вхідної змінної різні, то зміна номерів позицій Δn КМ визначається алгебраїчною сумою (3.27), тобто переміщення КМ здійснюється у бік, протилежний максимальному відхиленню за формулою

$$\Delta n = -\{|\Delta n_1| Sign x_1 + |\Delta n_2| Sign x_2\}. \quad (3.27)$$

Реалізацію зазначеної процедури можна пояснити формулою

$$\Delta n = -\{(\Delta n_1 OR \Delta n_2) Sign x_1\}^\varphi \cdot \{\Delta n_1 Sign x_1 + \Delta n_2 Sign x_2\}^{1-\varphi}, \quad (3.28)$$

де φ – код знаку відхилення добутку вхідної змінної, тобто

$$\varphi = \begin{cases} 1 & \text{якщо } Sign x_1 \cdot Sign x_2 > 0, \\ 0 & \text{якщо } Sign x_1 \cdot Sign x_2 \leq 0 \end{cases}$$

$Sign x_1 \cdot Sign x_2$ – знак відповідно змінної x_1 та x_2 .

У додатку А наведена мережа Петрі, що ілюструє вибір керуючого впливу РО при корегуванні швидкості руху.

Приклад реалізації функціональних переходів для дефазифікації вихідних змінних на етапі активізації та реалізації відповідних обчислень за формулою (3.26) і (3.27) наведено на рис.3.16.

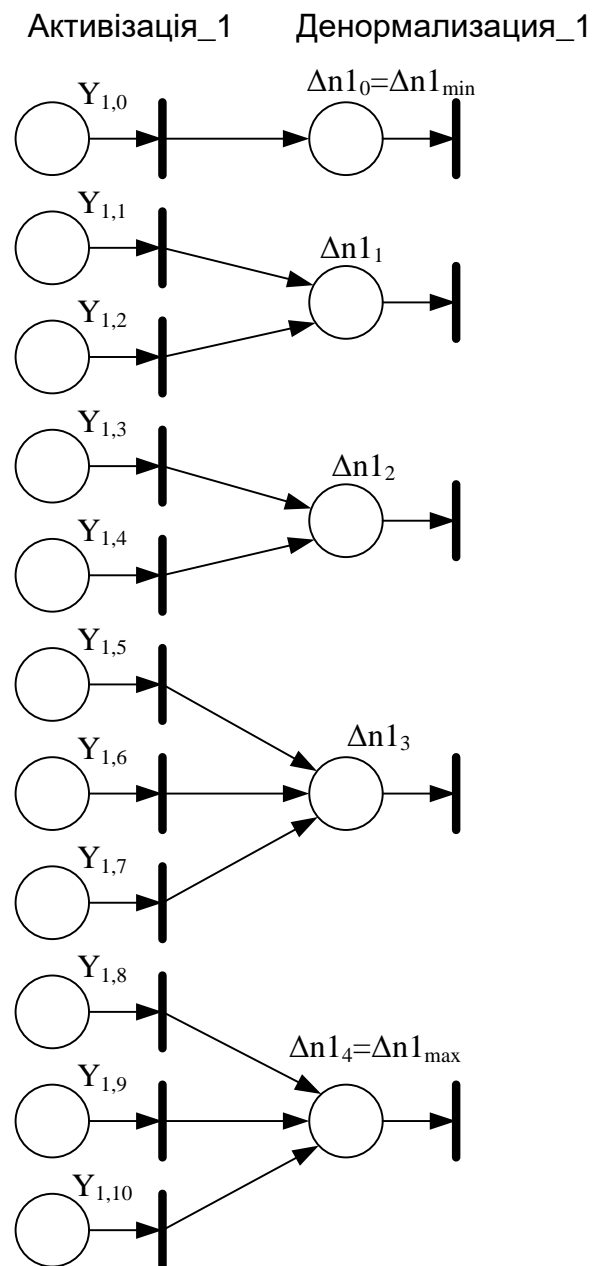


Рис.3.16. Приклад реалізації функціональних переходів для дефазифікації вихідних змінних

На рис.3.17 наведено універсальну графову модель підсистем керування параметрами руху РО, що відповідає реалізації нових розроблених функціональних переходів f_i і F_i , які дають змогу реалізувати різні відношення, композиції відношень і логічних формул, і правил прикладу 3, аналогічно розглянутим вище (ФАЗИФІКАЦІЇ F_{agr} вхідних змінних, яка здійснює операцію агрегування – знаходження ступенів істинності для усіх вхідних термів; КОМПОЗИЦІЇ F_{comp} НЕЧІТКИХ МНОЖИН; КОМПОЗИЦІЇ $R_{ij}=(R_i \circ R_j)$ відношення або max–min – згортки; ДЕФАЗИФІКАЦІЇ вихідних змінних, яка здійснює операцію активізації F_{akt} підзаключень – знаходження ступенів істинності усіх заключень правил НП на етапі логічного розв’язання й акумуляції F_{akk} заключень правил НП – знаходження сумарної функції приналежності для всіх лінгвістичних змінних множин правил НП на етапі формування управляючого впливу).

Висновки

1. Запропоновано розширення чітких МП, яке полягає в доповненні відомих елементів МП новими елементами – спеціальними квазідвонаправленими дугами і їхніми з'єднаннями, введення яких збільшує мовні можливості зображення графів особливо при побудові моделей, які відображують маневрові пересування РО, та скорочує складність моделей до 50%.

2. Для надання чітким МП динамічних властивостей в переходи введено затримку міток у часі на будь–яке число тактів моделювання. Врахування затримок часу запропоновано описувати дискретною передатною функцією затримки спрацьовування переходів на k тактів дискретного часу, що на відміну від відомих моделей дає можливість досліджувати динаміку функціонування МП у реальному часі з використанням методів аналізу та синтезу динамічних систем.

3. Для нечітких МП запропоновані нові розширення функціональних квазідвонаправлених складних переходів:

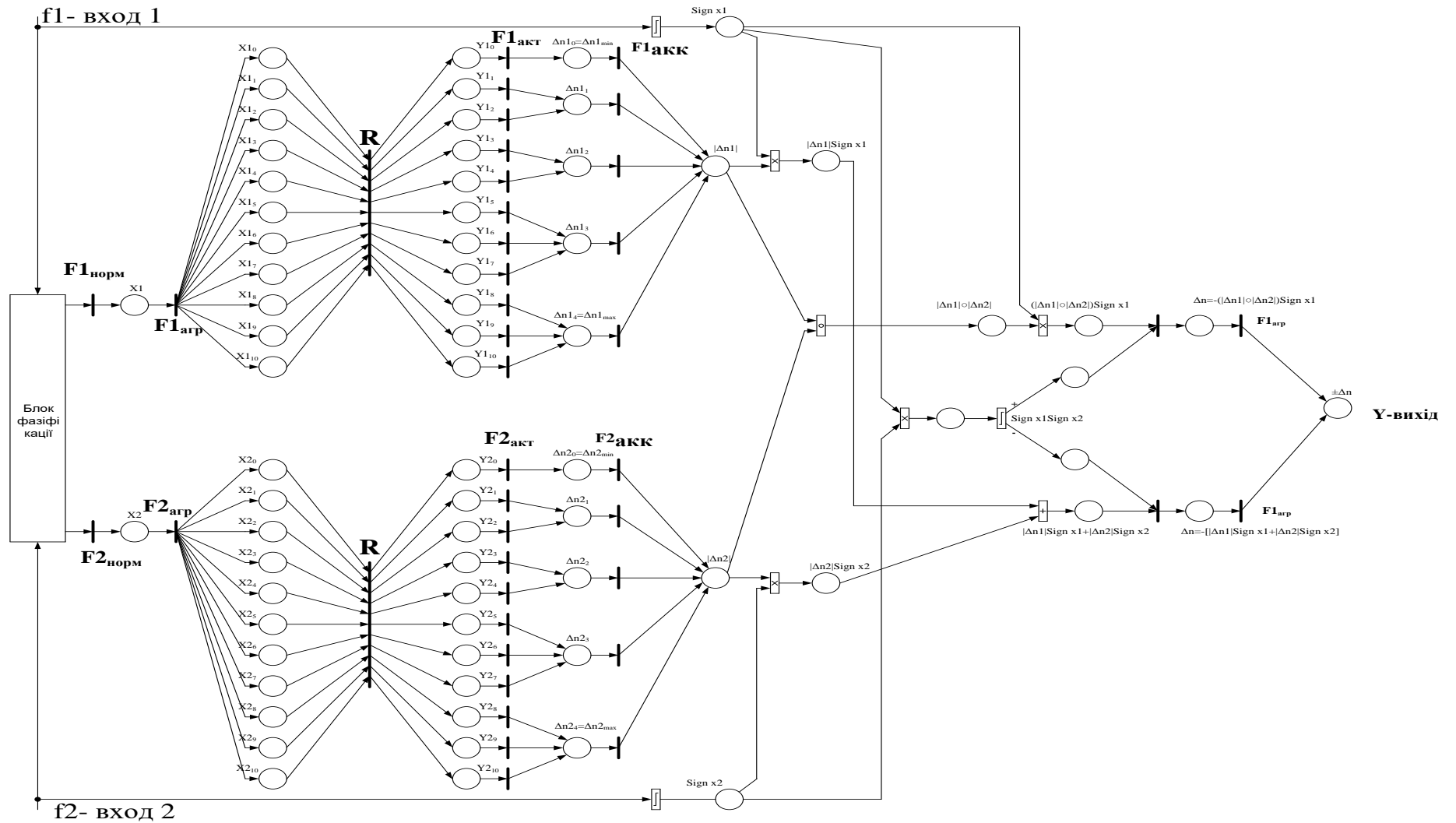


Рис.3.17. Узагальнена мережа Петрі з новими функціональними переходами

імплікаційний перехід – ВІДНОШЕННЯ $R_{j,i}(X_{ji} \times Y_{ji})$ між змінними X_{ji} і Y_{ji} , тобто i значень j термів змінної X_{ji} у фазифіковані значення відповідних i термів відповідних j лінгвістичних або нечітких змінних Y_{ji} , що реалізує висловлення ЯКЩО – ТО. При цьому умові ЯКЩО цього правила відповідає множина вхідних позицій $P_{j,i}(X_{ji})$ цього переходу, а висновку ТО – множина вихідних позицій $P_{j,i+1}(Y_{ji})$;

переходи, що реалізують наступні операції:

- КОМПОЗИЦІЇ $F_{комп}$ НЕЧІТКИХ МНОЖИН A та ВІДНОШЕНЬ R_i , тобто $F_{комп} = (A \circ R_i)$;
- КОМПОЗИЦІЇ R_{ij} ВІДНОШЕНЬ R_i і ВІДНОШЕНЬ R_j , тобто ВІДНОШЕНЬ $R_{ij} = (R_i \circ R_j)$ або max–min – згортки;
- ФАЗИФІКАЦІЇ $F_{агр}$ вхідних змінних, яка здійснює агрегування – знаходження ступенів істинності для усіх вхідних термів;
- ДЕФАЗИФІКАЦІЇ вихідних змінних, яка здійснює активізацію $F_{акт}$ підзаключень – знаходження ступенів істинності усіх заключень правил нечітких продукцій (НП) на етапі логічного розв’язання й акумуляції $F_{акк}$ заключень правил НП – знаходження сумарної функції приналежності для всіх лінгвістичних змінних множин правил НП на етапі формування управляючого впливу (наприклад, за запропонованим критерієм упевненості в правильності прийняття рішення).

Вказані розширення дозволили створити універсальну графову модель диспетчерських підсистем керування параметрами руху РО, яка функціонує при нечітких умовах та дає змогу досліджувати формування керуючих дій (завдання параметрів руху) рухомих одиниць і дозволяє до 2-х разів скоротити час вироблення керуючих дій. Розроблені моделі дозволяють удосконалити експлуатацію рейкових засобів залізниць.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ПІДСИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ

Диспетчерські підсистеми керування технологічними процесами рейкового транспорту утворюють середній рівень комплексної СКРТ. Від їх функціонування залежить правильність формування керуючих дій у КК нижнього рівня системи [182, 220].

4.1. Логіко-динамічна розподілена модель руху РО

На основі декомпозиції диспетчерської підсистеми нижче розроблені моделі їх окремих складових. Відомо, що в ролі моделей можуть бути використані графові мережі (наприклад, мережі Петрі), процедури масового обслуговування та ін. Доцільно вибрати графові моделі, які в найбільшій мірі відповідають географічному принципу організації мережі магістрального залізничного транспорту та його складових (станцій, перегонів та ін.). На основі [162, 164] на рис.4.1 показано схему мережі і маршрутів руху приміських поїздів Харківського вузла Південної залізниці (ПЗ).

Крім того, на окремих станціях (приклад мнемосхеми окремої залізничної станції наведений на рис 4.2,*a*) може проводитися формування поїздів та маневрова робота. Розглянемо приклад мережі маневрових маршрутів окремої станції рис.4.2,*a*, яка може бути подана графовою структурою (рис. 4.2,*б*) з виділеними особливими ділянками. Вона містить 55 вершин, у ролі яких виступають стрілочні переводи, кінцеві пункти, а також 66 дуг, якими служать рейкові нитки, що сполучають вершини мережі. Схема маршрутів (рис. 4.2,*б*) зображена у вигляді неорієнтованого графа. Вершини відображують номери ділянок, а дуги - сполучення виділених ді-

лянок. Цифра над дугою відбиває час руху або кількість вершин маршруту між граничними зупинками ділянок.

Нижче надано основні поняття (множина, розміщення, кортеж та ін.) стосовно рейкового транспорту та запропоновані процедури їх опису з використанням МП. Так, наприклад, кортеж позначено як кінцеву впорядковану множину РО. Припустимо, що диспетчер повинен керувати станом (у певний момент часу) РО на маршруті. Для цього необхідно знати розташування кожної РО в цей момент часу. Множина цих РО визначить кортеж стану C_m m -го маршруту. Отже, стан маршруту в цілому визначається розташуванням РО. Такий стан є вектором, тобто складним об'єктом, що має певну кількість компонентів або складових. Кортеж (вектор) записується в кутових дужках: $\langle C_1, C_2, \dots, C_m \rangle$. Кортеж з незбіжними елементами трактуємо як розміщення РО.

Розглянемо опис мережі рейкового транспорту з використанням уведених понять.

У мережі визначено m різних маршрутів і r вершин мережі. На першому маршруті має місце кортеж j_1 РО, на другому - j_2 РО, на m -ому - j_m РО. Кожний кортеж C_m характеризує стан маршруту в поточний момент vT часу на осі часу i (тобто місце розташування кортежу РО в кожний момент часу). Для опису цієї множини розміщень використовуємо поняття проєкції m -го кортежу C_m^i на i -ту вісь часу. Нехай $0 < i < m$. Проєкцією PP кортежу C_m^i на i -ту вісь часу позначимо у такий спосіб:

$$PP_{i_1 i_2 \dots i_m} C_m^i = PP_{i_1 i_2 \dots i_m} \langle C_1, C_2, \dots, C_m \rangle.$$

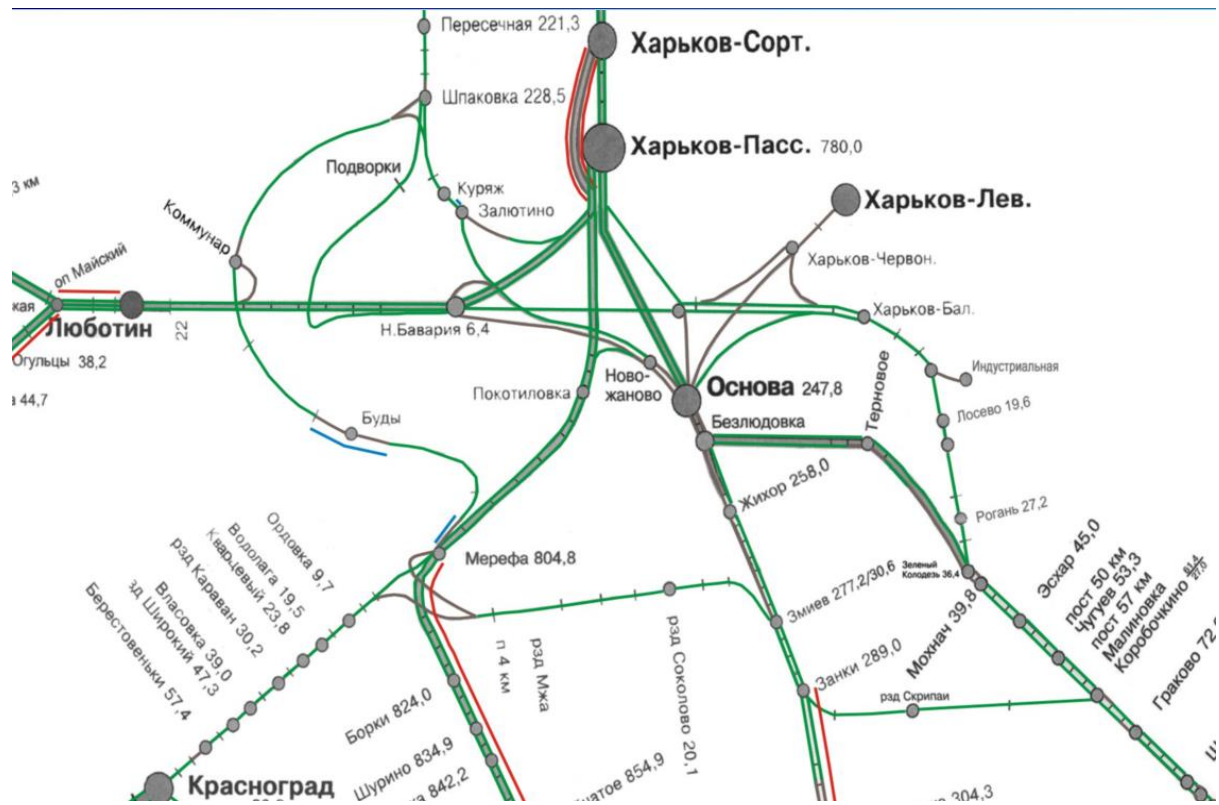
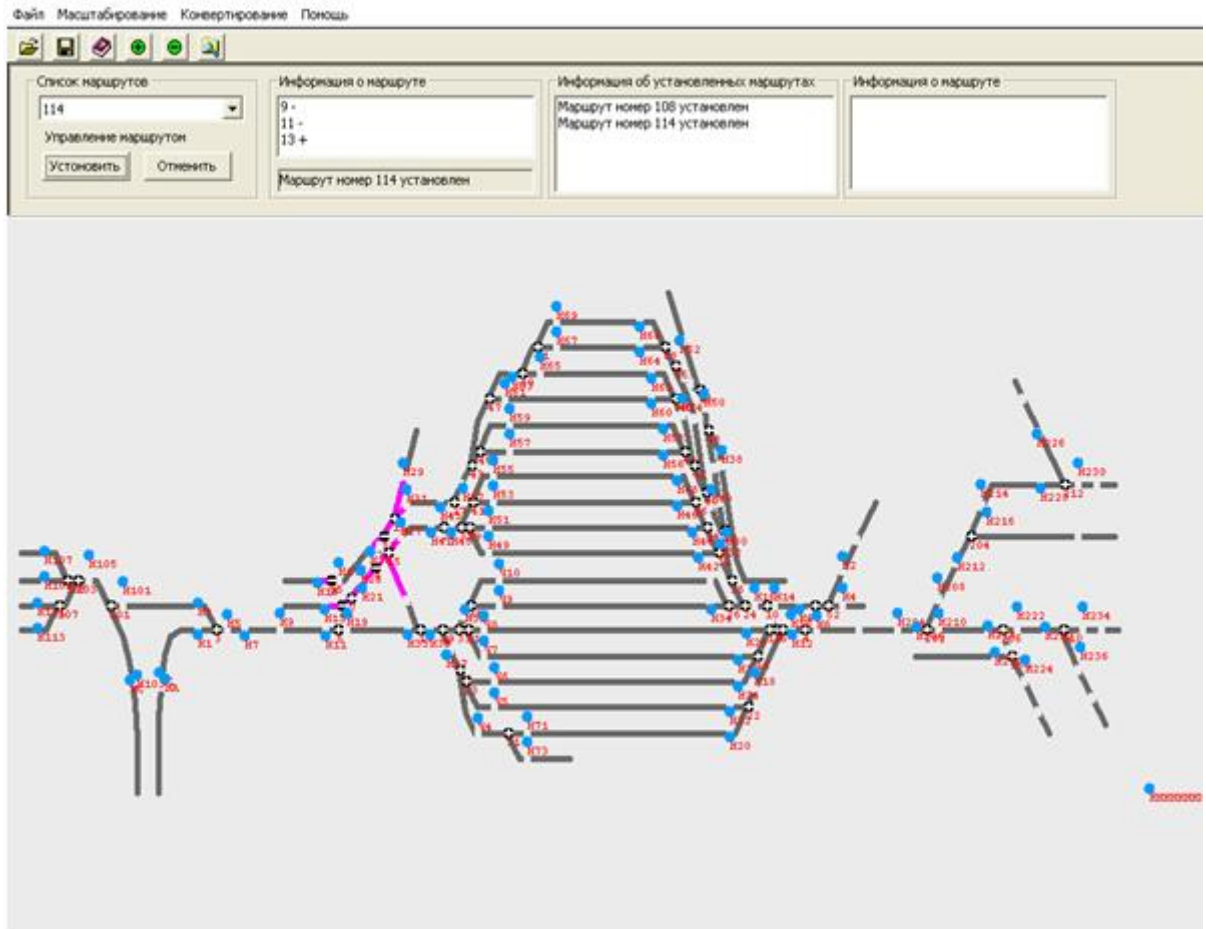
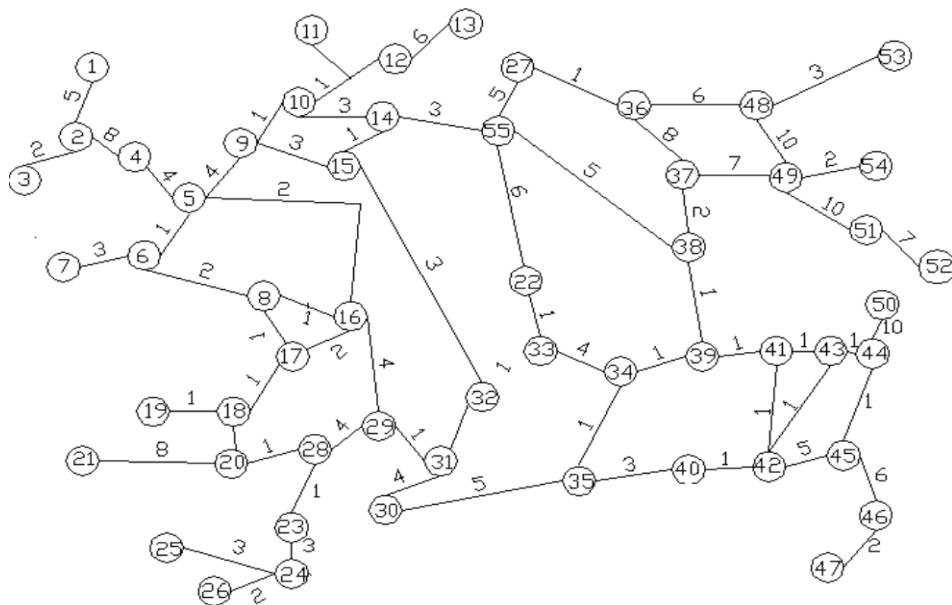


Рис. 4.1,б. Схема мережі переміщення РО (поїздів) Харківського вузла Південної Залізниці



а)



б)

Рис. 4.2. Приклад залізничної станції: а) мнемосхема, б) графова модель мережі маневрових маршрутів станції

Графова мережа рис.4.2,б відображує логіко-динамічну підсистему керування рейковим транспортом.

Кожна РО у часі розміщена на маршруті m . Відносно цієї РО розміщені усі інші РО цього маршруту. Якщо розглядати у часі розподіл РО, починаючи з нульової відносно усіх інших РО маршруту, то з використанням Z -перетворення розподіл станів нульової РО маршруту можна записати у вигляді

$$C_{m,0}^{\lambda_r, \nu}(Z) = \frac{1}{1 - Z^{-M_m}} \sum_{\nu=0}^{M_m} C_{m,r}^{\nu} Z^{-\lambda_r, \nu}, \quad (4.1)$$

де r – номер вершини мережі, у якій перебуває j -та РО $\{j \in (0, N)\}$ в ν -й момент часу;

$\nu T (\nu = 1, 2, \dots, 2M_m)$ - відрізки часу;

λ_r - коефіцієнт, що враховує зміну значень ν ;

$C_{m,r}^{\nu}$ - стан РО (якщо $C_{m,r}^{\nu} = 1$, то в цій вершині мережі знаходиться РО, а якщо $C_{m,r}^{\nu} = 0$, то РО - відсутня).

У такий спосіб формула відбиває розподіл станів j РО у вершинах r мережної моделі в ν -ті моменти часу.

Представимо розподіл станів $C_{m,j}^{\nu}$ окремої j -ої РО на m -му маршруті в відносні ν -ті моменти часу у вигляді графіка, наведеного на рис. 4.3.

На рис.4.3 на осі абсцис відкладені відрізки часу $\nu T (\nu = 1, 2, \dots, 2M_m)$, а на осі ординат - стан $C_{m,j}^{\nu}$ та номер вершини r -го вузла мережної моделі, у якій перебуває j -та РО в ν -й момент часу.

Для опису моделі розподілу решітчастих кортежів $C_{m,j}^{\nu}$ на дискретній множині часу $i = j + \nu$ (j -зсув часу РО відповідно нульової РО) скористаємося Z -перетворенням дискретних функцій, якими є решітчасті функції

станів $C_{m,j}^v(Z)$, поняттями кортежу й проєкції кортежу на i -ту вісь дискретного часу (i, r) .

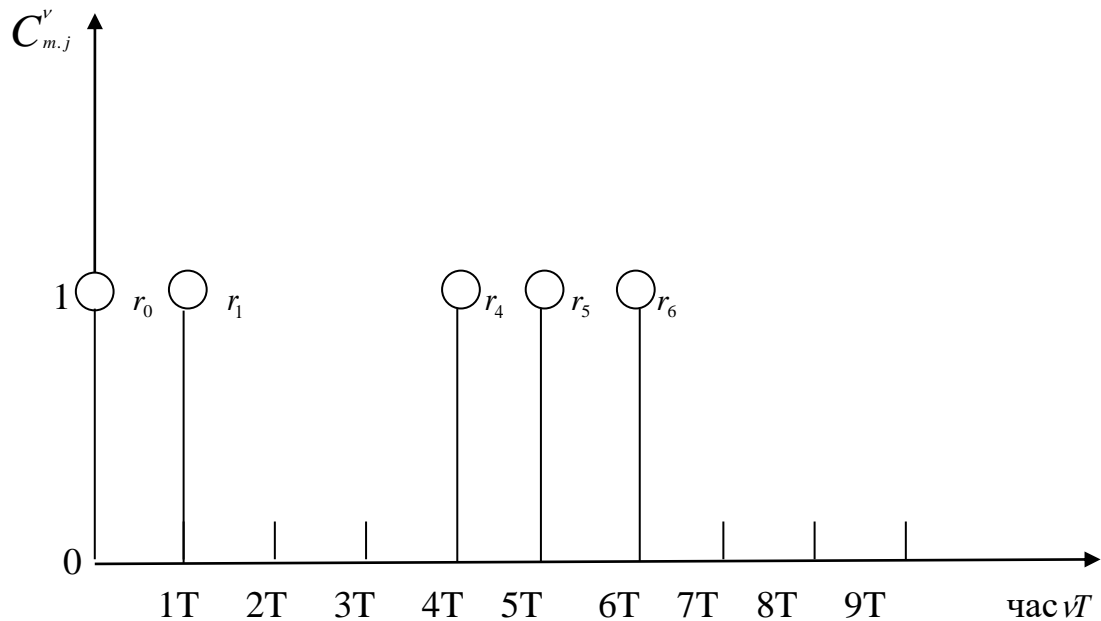


Рис. 4.3. Графік станів, у яких перебуває j -та РО в ν -й момент часу

Для опису розподілів РО й кортежів РО у зворотному напрямку введемо позначення $\overline{C}_m^{\lambda_r \nu}$, $\overline{C}_m^{\eta_k \lambda_j j}$.

Використовуючи прийняті вище позначення, поняття та теореми зображення, стан кожного з кортежів у прямому й зворотному напрямках можна подати формулою

$$C_{m,j}^i(Z) = C_m^{\lambda_r \nu}(Z) C_m^{\eta_m \lambda_j j}(Z) + \overline{C}_m^{\lambda_r \nu}(Z) \overline{C}_m^{\eta_m \lambda_j j}(Z) =$$

$$= \frac{Z^{M_m}}{Z^{M_m} - 1} \left\{ \sum_{\nu=0}^{M_m} C_{m,r}^{\nu} Z^{-\lambda_r \nu} \sum_{j=0}^{N_m} Z^{-\eta_m \lambda_j j} + \sum_{\nu=0}^{M_m} \overline{C}_{m,r}^{\nu} Z^{-\lambda_r \nu} \sum_{j=0}^{N_m} Z^{-\eta_m \lambda_j j} \right\},$$
(4.2)

де $N_m = \overline{0, m}$, -поточне число РО на m -му маршруті, яке може бути розраховане, наприклад, за методами теорії масового обслуговування, це залежить від кількості пасажирів за часом доби,

λ_j - коефіцієнт, що враховує зміну значень $\eta_m j$,

η_m - число інтервалів ($\eta_m = (0, M_m - 1)$), через які розміщені всі РО m -го маршруту.

Таким чином, для одержання необхідного опису динаміки кортежів, наведених послідовностями решітчастих функцій на множині (r, v, j, m, η_m) , необхідно розподіл j -ої РО на множині r вершин мережної моделі в v -ті моменти часу помножити на кортежі з N_m РО в $\eta_m j$ -ті моменти часу. Отримані розподіли проєкцій j кортежів на i -ту вісь часу ($i = \eta_m j + v$) й дадуть шуканий розподіл кортежів.

Подамо всі нульові розподіли РО $C_{m,0}^v \left\langle r \frac{v}{v} \right\rangle$ у вигляді послідовності дробів, вигляду $\left\langle r \frac{v}{v} \right\rangle$, де r указує номер вершини мережі, чисельник дробу - час $\lambda_v v T$ проходження РО цієї вершини в прямому напрямі, а знаменник - час $\lambda_v^{-1} v T$ -- час проходження вершини мережі у зворотному напрямі. Для опису мережі рис.4.2,б маємо

$$C_{1,0} \langle \rangle = \left\langle 7 \frac{0}{21}, 6 \frac{3}{18}, 8 \frac{5}{16}, 16 \frac{6}{15}, 17 \frac{8}{13}, 18 \frac{9}{12}, 19 \frac{10}{11} \right\rangle,$$

$$C_{2,0} \langle \rangle = \left\langle \begin{array}{l} 1 \frac{0}{105}, 2 \frac{5}{100}, 4 \frac{13}{92}, 5 \frac{17}{88}, 6 \frac{18}{27}, 8 \frac{20}{86}, 16 \frac{21}{84}, 29 \frac{25}{80}, 31 \frac{26}{73}, 30 \frac{30}{69}, 35 \frac{35}{64}, 34 \frac{36}{63}, \\ 39 \frac{37}{62}, 38 \frac{38}{61}, 37 \frac{40}{59}, 40 \frac{47}{52}, 54 \frac{49}{50} \end{array} \right\rangle,$$

$$C_{3,0} \langle \rangle = \left\langle 21 \frac{0}{40}, 20 \frac{8}{38}, 28 \frac{9}{37}, 29 \frac{10}{33}, 31 \frac{11}{32}, 30 \frac{15}{28}, 23 \frac{16}{27}, 24 \frac{19}{24}, 26 \frac{21}{22} \right\rangle,$$

$$C_{5,0} \langle \rangle = \left\langle \begin{array}{l} 11 \frac{0}{76}, 10 \frac{1}{75}, 9 \frac{2}{74}, 15 \frac{5}{71}, 32 \frac{8}{68}, 33 \frac{9}{64}, 34 \frac{13}{60}, 35 \frac{14}{59}, 40 \frac{17}{56}, 42 \frac{18}{55}, 45 \frac{23}{50}, \\ 46 \frac{29}{44}, 47 \frac{41}{42} \end{array} \right\rangle,$$

$$C_{6,0} \langle \rangle = \left\langle \begin{array}{l} 19 \frac{0}{53}, 18 \frac{1}{52}, 20 \frac{1}{52}, 28 \frac{2}{51}, 29 \frac{6}{47}, 31 \frac{7}{46}, 32 \frac{8}{45}, 33 \frac{9}{44}, 34 \frac{13}{40}, 39 \frac{14}{39}, 38 \frac{15}{38}, \\ 37 \frac{17}{36}, 49 \frac{24}{29}, 54 \frac{26}{27} \end{array} \right\rangle,$$

$$\begin{aligned}
C_{7.0} \langle \rangle &= \left\langle 25 \frac{0}{57}, 24 \frac{3}{51}, 23 \frac{6}{47}, 30 \frac{7}{46}, 31 \frac{11}{42}, 32 \frac{12}{41}, 15 \frac{15}{38}, 14 \frac{16}{37}, 10 \frac{19}{29}, 3 \frac{26}{27} \right\rangle, \\
C_{8.0} \langle \rangle &= \left\langle 47 \frac{0}{84}, 46 \frac{2}{82}, 45 \frac{7}{76}, 42 \frac{12}{71}, 40 \frac{13}{70}, 35 \frac{16}{67}, 34 \frac{17}{66}, 39 \frac{18}{65}, 38 \frac{19}{64}, 37 \frac{21}{62}, \right. \\
&\quad \left. 49 \frac{28}{55}, 48 \frac{38}{45}, 53 \frac{41}{42} \right\rangle \quad (4.3) \\
C_{12.0} \langle \rangle &= \left\langle 13 \frac{0}{59}, 12 \frac{6}{53}, 10 \frac{7}{52}, 9 \frac{8}{51}, 5 \frac{12}{47}, 16 \frac{14}{45}, 17 \frac{16}{43}, 18 \frac{18}{42}, 21 \frac{36}{37} \right\rangle, \\
C_{16.0} \langle \rangle &= \left\langle 53 \frac{0}{57}, 48 \frac{3}{54}, 36 \frac{9}{48}, 37 \frac{17}{42}, 38 \frac{19}{40}, 55 \frac{24}{35}, 27 \frac{24}{30} \right\rangle, \\
C_{20.0} \langle \rangle &= \left\langle 1 \frac{0}{48}, 2 \frac{5}{43}, 4 \frac{13}{35}, 5 \frac{18}{31}, 16 \frac{20}{29}, 17 \frac{22}{27}, 18 \frac{23}{26}, 19 \frac{24}{25} \right\rangle, \\
C_{22.0} \langle \rangle &= \left\langle 54 \frac{0}{43}, 49 \frac{2}{41}, 37 \frac{9}{34}, 38 \frac{11}{32}, 55 \frac{16}{27}, 27 \frac{21}{22} \right\rangle, \\
C_{23.0} \langle \rangle &= \left\langle 53 \frac{0}{61}, 48 \frac{3}{58}, 49 \frac{13}{48}, 51 \frac{23}{38}, 52 \frac{30}{31} \right\rangle, \\
C_{26.0} \langle \rangle &= \left\langle 52 \frac{0}{94}, 51 \frac{7}{87}, 49 \frac{17}{77}, 48 \frac{27}{67}, 36 \frac{33}{61}, 27 \frac{34}{60}, 55 \frac{39}{55}, 14 \frac{43}{52}, 10 \frac{46}{49}, 11 \frac{47}{48} \right\rangle, \\
C_{27.0} \langle \rangle &= \left\langle 26 \frac{0}{67}, 24 \frac{2}{65}, 23 \frac{5}{62}, 30 \frac{6}{61}, 35 \frac{11}{56}, 34 \frac{12}{55}, 39 \frac{13}{54}, 38 \frac{14}{53}, 37 \frac{16}{51}, 36 \frac{24}{43}, \right. \\
&\quad \left. 48 \frac{30}{37}, 53 \frac{33}{34} \right\rangle.
\end{aligned}$$

З урахуванням (4.1)-(4.3) на рис.4.4 надані структури трьох маршрутів 1 – 3 у вигляді МП.

З урахуванням (4.2) запишемо зображення $C_{1.0}^v(Z)$ розподілу нульової РО 1-го маршруту в прямому і зворотному напрямках

$$C_{1.0} \left\langle r \frac{v}{v} \right\rangle \text{ як } C_{1.0}^v(Z) = Z \left\{ C_{1.0} \left\langle r \frac{v}{v} \right\rangle \right\}$$

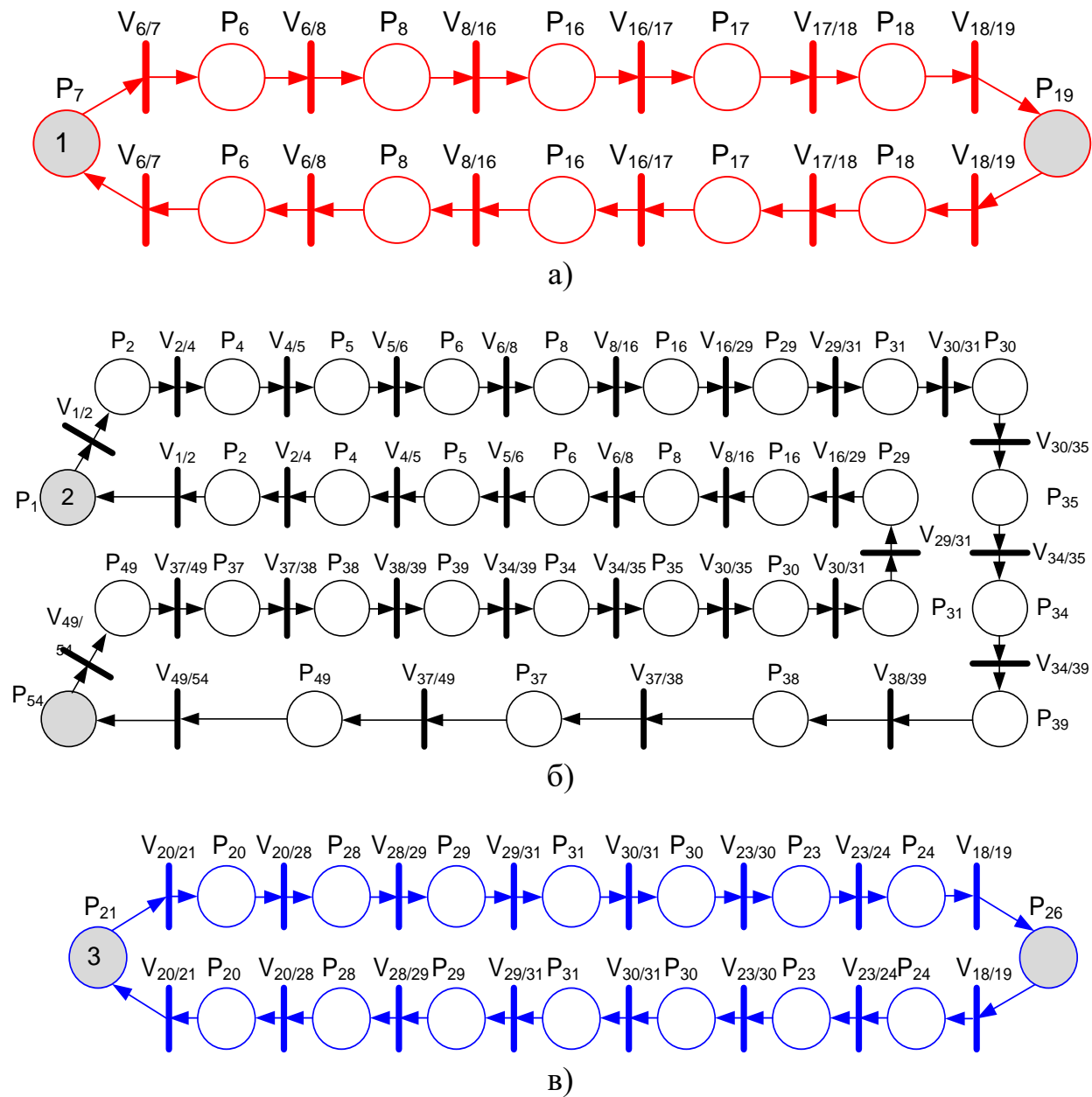


Рис. 4.4. Мережі Петрі маршрутів: а) 1-ий, б) 2-ий, в) 3-й - маршрути

$$C_{1.0}^v(Z) = \frac{Z^{22}}{Z^{22}-1} \left\{ \sum_{v=0}^{10} Z_r^{-v\lambda_r} + \sum_{v=11}^{21} Z_r^{-\bar{v}\bar{\lambda}_r} \right\} = \frac{1}{1-Z^{-22}} \times$$

$$\times \left(\mathbf{1}_7^{\lambda_7} + Z_6^{-3\lambda_6} + Z_8^{-5\lambda_8} + Z_{16}^{-6\lambda_{16}} + Z_{17}^{-8\lambda_{17}} + Z_{18}^{-9\lambda_{18}} + \right. \\ \left. + Z_{19}^{-10\lambda_{19}} + Z_{19}^{-11\bar{\lambda}_{19}} + Z_{18}^{-12\bar{\lambda}_{18}} + Z_{17}^{-13\bar{\lambda}_{17}} + Z_{16}^{-15\bar{\lambda}_{16}} + Z_8^{-16\bar{\lambda}_8} + Z_6^{-18\bar{\lambda}_6} + Z_7^{-21\bar{\lambda}_7} \right). \quad (4.4)$$

Припустимо, що РО 1-го маршруту розміщені послідовно, одна за одною, через $\eta_1 = 2$ інтервалів $\eta_1 \lambda T$. У цьому випадку всі N_1 РО кортежу першого маршруту можна подати такою моделлю для $N_1 = FIX \left\{ \frac{M_1}{n_1} \right\}$:

$$C_{1.j}^i(Z) = C_{1.0}^v(Z) \sum_{j=0}^{N_1} Z^{-2\lambda_j j} = C_{1.0}^v(Z) \left(\mathbf{1}_0 + Z_1^{-\eta_1 \lambda_1} + Z_2^{-\eta_2 \lambda_2} + Z_3^{-\eta_3 \lambda_3} + Z_4^{-\eta_4 \lambda_4} + Z_5^{-\eta_5 \lambda_5} + \right. \\ \left. + Z_6^{-\eta_6 \lambda_6} + Z_7^{-\eta_7 \lambda_7} + Z_8^{-\eta_8 \lambda_8} + Z_9^{-\eta_9 \lambda_9} + Z_{10}^{-\eta_{10} \lambda_{10}} \right), \quad (4.5)$$

$$N_1 = FIX \left\{ \frac{21}{2} \right\} = 10.$$

Отримана модель дозволяє у будь-який момент часу $i = v + j$ визначити місцезнаходження будь-якої РО на множинах $(i, r, M_m, v, \bar{v}, j, m, \eta_b)$ як розподіл проекцій кортежу $C_{m,j}^i$ на i -ту вісь часу.

$$PP_i C_{m,j}^i = PP_i \langle C_{m,0}^i, C_{m,1}^i, \dots, C_{m,N}^i \rangle.$$

З розподілів РО (4.1) і розміщень РО (4.2) випливає, що для ряду маршрутів одна з r вершин мережі буде загальною, тобто через цю r -ту вершину може пройти в i -ті моменти часу $C_{m,r}^i(Z)$ РО відповідно до формули

$$C_{m,r}^i(Z) = \frac{1}{1-Z^{-M_k}} \sum_{m=0}^l [C_{m,r}^v Z^{-\lambda_r v} C_r^{\eta_k \lambda_j j}(Z)].$$

Таким чином, остання формула визначає відносно розміщення всіх РО, що проходять через r -ту вершину мережі в i -ті моменти часу.

Впливаючи на нечіткі параметри λ_r, η_m , і λ_j , можна здійснювати управління ситуацією на маршрутах мережі.

4.2. Розроблення структури бази знань

Глобальні диспетчерські управління приймаються підсистемою ситуаційного моделювання шляхом вироблення керуючих дій [15, 20, 23,]. Інтеграція двох класів ситуаційних систем – ситуаційної підсистеми керування реального часу і ситуаційної підсистеми моделювання в модельному часі – здійснюється за допомогою моделі виробничої ситуації, яка працює в реальному часі.

На рис. 4.5 подана структура бази знань, на основі якої може бути здійснена вказана інтеграція моделей.

У реальному часі в моменти формування керуючих дій за правилами з БПЗ_1 здійснюється аналіз виробничої ситуації і, якщо в ній наявні фрагменти, що задовольняють умови, коли потрібні глобальні диспетчерські керування, стартує робота логіко-динамічної моделі (ЛДМ). Перший етап, згідно з рис.4.5, - формування моделі узагальненої ситуації, з якою працює ЛДМ. Для побудови необхідного початкового розподілу РО за маршрутами, відповідними їх реальному положенню, ЛДМ формується за декларативними правилами з БДЗ_1.

ЛДМ здійснює моделювання пересування РО в модельному часі, модифікуючи на кожному кроці узагальнену ситуацію.

На кожному кроці модель узагальненої ситуації аналізується правилами БПЗ_2 і БПЗ_3. Правила оцінки узагальненої моделі (БПЗ_3) перевіряють ситуацію на наявність фрагмента – мета, за наявності якого припиняється моделювання і приймається диспетчерське рішення. Правила модифікації параметрів ЛДМ (БПЗ_2) аналізують модель узагальненої ситуації на предмет наявності фрагментів, що описують “погані виробничі ситуації,” і формують зміну параметрів ЛДМ, після чого починається моделювання з початкового розподілу РО.



Рис. 4.5. Структура бази знань

У момент закінчення моделювання, що визначене правилами БПЗ_3, формуються керуючі дії, які заносяться в модель виробничої ситуації реального часу. Це виконується за правилами з БДЗ_2.

4.3. Формування декларативної бази знань

4.3.1. Правила формування узагальненої модельної ситуації

Задача, яка розв'язується за допомогою правил БПЗ_1 – побудувати розподіл РО по кожному маршруту, тобто конкретизувати параметри $\underline{\eta}_{l,t}$ моделі (4.4), де $\underline{\eta}_{l,t}$ - відстань в одиницях інтервалів t часу моделювання l -тої РО маршруту по відношенню до l -1-ої РО. Таким чином, фрагмент структури ситуації ЛДМ, що описує початкове розміщення РО, може бути наведений у вигляді

$$\tilde{c} = \{\tilde{c}_1 + \tilde{c}_2 + \dots + \tilde{c}_m + \dots + \tilde{c}_{16}\} \quad (4.6)$$

де \tilde{c}_m — фрагмент структури початкового розміщення РО на маршруті m

$$\tilde{c}_m = \{\underline{\eta}_{1,t} + \underline{\eta}_{2,t} + \dots + \underline{\eta}_{l,t} + \dots + \underline{\eta}_{24,t}\} \quad (4.7)$$

де $\underline{\eta}_{l,t} = \{1 | \mu(1) = 0; 2 | \mu(1) = 0; \dots, t | \mu(1) = 1, \dots, 25 | \mu(1) = 0\}$ — нечітка множина ВІДСТАНЬ, елементи якої відповідають інтервалу t одиниць модельного часу l -ої РО маршруту m по відношенню до l -1-ої РО. Наприклад, якщо друга ($l=2$) РО маршруту m знаходиться на ВІДСТАНІ $t=5$ одиниць модельного часу t по відношенню до першої РО, то маємо

$$\underline{\eta}_{2,5} = \{1 | 0, 2 | 0, 3 | 0, 4 | 0, 5 | 1, 6 | 0, 7 | 0, \dots, 24 | 0\}.$$

Формування структури (4.6) і (4.7) здійснюється на підставі фрагмента ситуації місцезнаходження РО (що буде розглянуто нижче у розділі 5, рис. 5.5). Розглянемо це на прикладі 1-го маневрового маршруту. У момент

надходження будь-якої РО маршруту на кінцеву зупинку “зуп.1” ця РО приймається за першу в ЛДМ. Далі будуються нечіткі множини $\underline{\eta}_{2,t}, \underline{\eta}_{3,t}, \dots, \underline{\eta}_{m,t}$ в (4.7). Основою для побудови цих множин є елементи рівня ${}^3C_j^1$ (рис. 4.5), які відображають місцеположення РО з точністю до ділянок маршруту між сусідніми зупинками. МП для обчислення $\underline{\eta}_2$ наведена на рис. 4.6. На нижньому рівні використовується нечітка множина $\underline{\text{ДЛЯНКИ}} = \{Y_7^1 | \mu(Y_7^1), Y_7^2 | \mu(Y_7^2), \dots, Y_{19}^1 | \mu(Y_{19}^1), Y_{-19}^1 | \mu(Y_{-19}^1), \dots, Y_{-7}^2 | \mu(Y_{-7}^2), Y_{-7}^1 | \mu(Y_{-7}^1)\}$, яка формується в реальному часі за правилами, згідно зі структурою рис. 4.5.

Оскільки друга РО може знаходитися не тільки на ділянці між зупинками “зуп. 1” і “зуп. 5”, але і рухатися від “зуп. 5” до “зуп. 1” (велика дистанція між сусідніми РО), тому нечітка множина $\underline{\text{ДЛЯНКИ}}$ включає елементи ділянок зустрічного руху, що позначено “мінусами” перед номером ділянки. Наприклад, Y_{19}^1 означає ділянку від “зуп. 1” до “зуп. 2”, а ділянка Y_{-19}^1 від “зуп. 2” до “зуп. 1”.

Нечітка множина $\underline{\text{ДЛЯНКИ}}$ індукує нечітку множину $\underline{\text{ДИСТАНЦІЯ 2}} = \{1_2 | \mu(1_2), 2_2 | \mu(2_2), 3_2 | \mu(3_2), \dots, 20_2 | \mu(20_2)\}$, елементи якої відповідають дистанції між першою і другою РО (індекс 2 позначає номер РО). Дистанція вимірюється в одиницях перегонів між сусідніми зупинками. У свою чергу нечітка множина $\underline{\eta}_{i,t}$ знаходиться як множина, індукована нечіткою множиною $\underline{\text{ДИСТАНЦІЯ 2}}$ з використанням нечіткого відображення ІФ, як показано на рис. 4.6. Декларативне правило, по якому знаходиться нечітка множина, має вигляд:

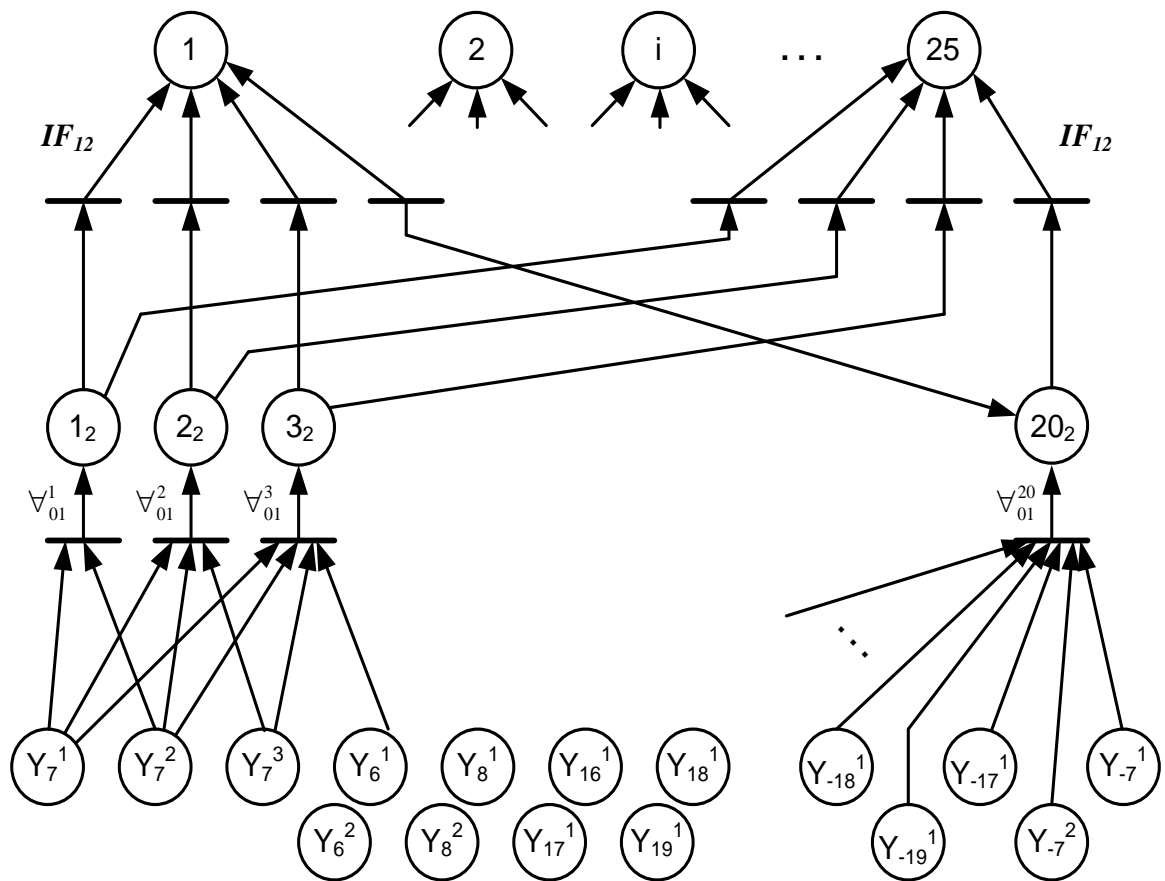


Рис. 4.6. Структура МП для обчислення ВІДСТАНІ $\eta_{l,t}$

$$\underline{\Pi 2} = \left\{ \begin{array}{l} ({}^1 \widehat{C}_1 = \{1_2 / 1, 2_2 / 1, \dots, 20_2 / 1\}, \underline{IF}_{12}), \\ ({}^0 \widehat{C}_1 = \{Y_7^1 / 0, Y_7^2 / 1\}, \forall_{01}^1), \\ ({}^0 \widehat{C}_2 = \{Y_7^1 / 0, Y_7^2 / 0, Y_7^3 / 1\}, \forall_{01}^2), \\ ({}^0 \widehat{C}_3 = \{Y_7^1 / 0, Y_7^2 / 0, Y_7^3 / 0, Y_6^1 / 1\}, \dots), \\ ({}^0 \widehat{C}_{20} = \{Y_7^1 / 0, Y_7^2 / 0, \dots, Y_{-7}^2 / 0, Y_{-7}^1 / 1\}, \forall_{01}^{20}) \end{array} \right\}, \quad (4.8)$$

де

	1_2		2_2		20_2	
Y_7^1	1		Y_7^1	1	Y_7^1	1
Y_7^2	1		Y_7^2	1	Y_7^2	1
Y_7^3	0		Y_7^3	1	Y_7^3	1
$\forall_{01}^1 = Y_6^1$	0	;	$\forall_{01}^2 = Y_6^1$	0;	$\forall_{01}^{20} = Y_6^1$	1
	.		.		.	
..		.		.		
Y_{-7}^1	0		Y_{-7}^1	0	Y_{-7}^1	1

		1	2	3	4	. .	25
1_2	0.9	0.75	0.15	0.05	.	.	0.0
2_2	0.75	0.95	1.0	0.95	.	.	0.0
3_2	0.15	0.85	0.95	1.0	.	.	0.0
$IF_{12} =$							
20_2	0.0	0.0	0.0	0.0	.	.	1.0

На рис. 4.7 наведена структура для обчислення нечіткої множини $\underline{\eta}_3$ - ВІДСТАНЬ між другою і третьою РО. Як видно з рис. 4.7, при обчисленні використовується нечітка множина ДИСТАНЦІЯ 2 (дистанція між першою

і другою РО), а також елементи множини ЗАЙНЯТІСТЬ ДІЛЯНКИ. Структура враховує всі можливі комбінації дистанцій другої РО. Наприклад, елемент ” 1_3^4 ” відповідає дистанції в один перегін між третьою і другою РО (нижній індекс “3” позначає третю РО), коли друга РО знаходиться на відстані чотирьох перегонів від першої (верхній індекс “4” указує на це). Дистанція i_j^t (i -номер перегону, t -відстань, j -номер РО) знаходиться як узагальнення всіх можливих комбінацій, тобто як індукована i_j^t множина з відображенням “хоча б один елемент”.

Декларативне правило Π_3 обчислення ВІДСТАНІ η_3 має вигляд

$$\Pi_3 = \left\{ \begin{array}{l} \left({}^2 \underline{\widehat{C}} = \{1_3 | 1, 2_3 | 1, \dots, 18_3 | 1, \}, \underline{IF}_{23} \right) \\ \left({}^1 \underline{\widehat{C}}_1 = \{1_3^1 | 1, 1_3^2 | 1, 1_3^3 | 1, \dots, 1_3^{19} | 1, \}, \exists_{12}^1 \right) \\ \left({}^1 \underline{\widehat{C}}_2 = \{2_3^1 | 1, 2_3^2 | 1, 2_3^3 | 1, \dots, 2_3^{18} | 1, \}, \exists_{12}^2 \right) \\ \dots \\ \left({}^1 \underline{\widehat{C}}_{17} = \{17_3^1 | 1, \}, 17_3^2 | 1, \}, \exists_{12}^{17} \right) \\ \left({}^1 \underline{\widehat{C}}_{18} = \{Y_7^2 | 0, Y_7^3 | 0, Y_6^1 | 0, \dots, Y_{-7}^2 | 0, Y_{-7}^1 | 1, \}, \exists_{12}^{18} \right) \\ \left({}^0 \underline{\widehat{C}}_1 = \{1_2 | 1, Y_7^3 | 0, Y_6^1 | 1, \}, \forall_{01}^1 \right) \\ \left({}^0 \underline{\widehat{C}}_2 = \{2_2 | 1, Y_6^1 | 0, Y_6^2 | 1, \}, \forall_{01}^2 \right) \\ \dots \\ \left({}^0 \underline{\widehat{C}}_{19} = \{19_2 | 1, Y_{-7}^2 | 0, Y_{-7}^1 | 1, \}, \forall_{01}^{19} \right) \\ \dots \\ \left({}^0 \underline{\widehat{C}}_{180} = \{2_2 | 1, Y_6^1 | 0, Y_6^2 | 0, \dots, Y_{-7}^2 | 0, Y_{-7}^1 | 1, \}, \forall_{01}^{180} \right) \end{array} \right\} \quad (4.9)$$

Аналогічний вигляд мають правила для обчислення η_4, η_5 (максимальна кількість РО на маршруті 1, за даними залізничної станції, – 5).

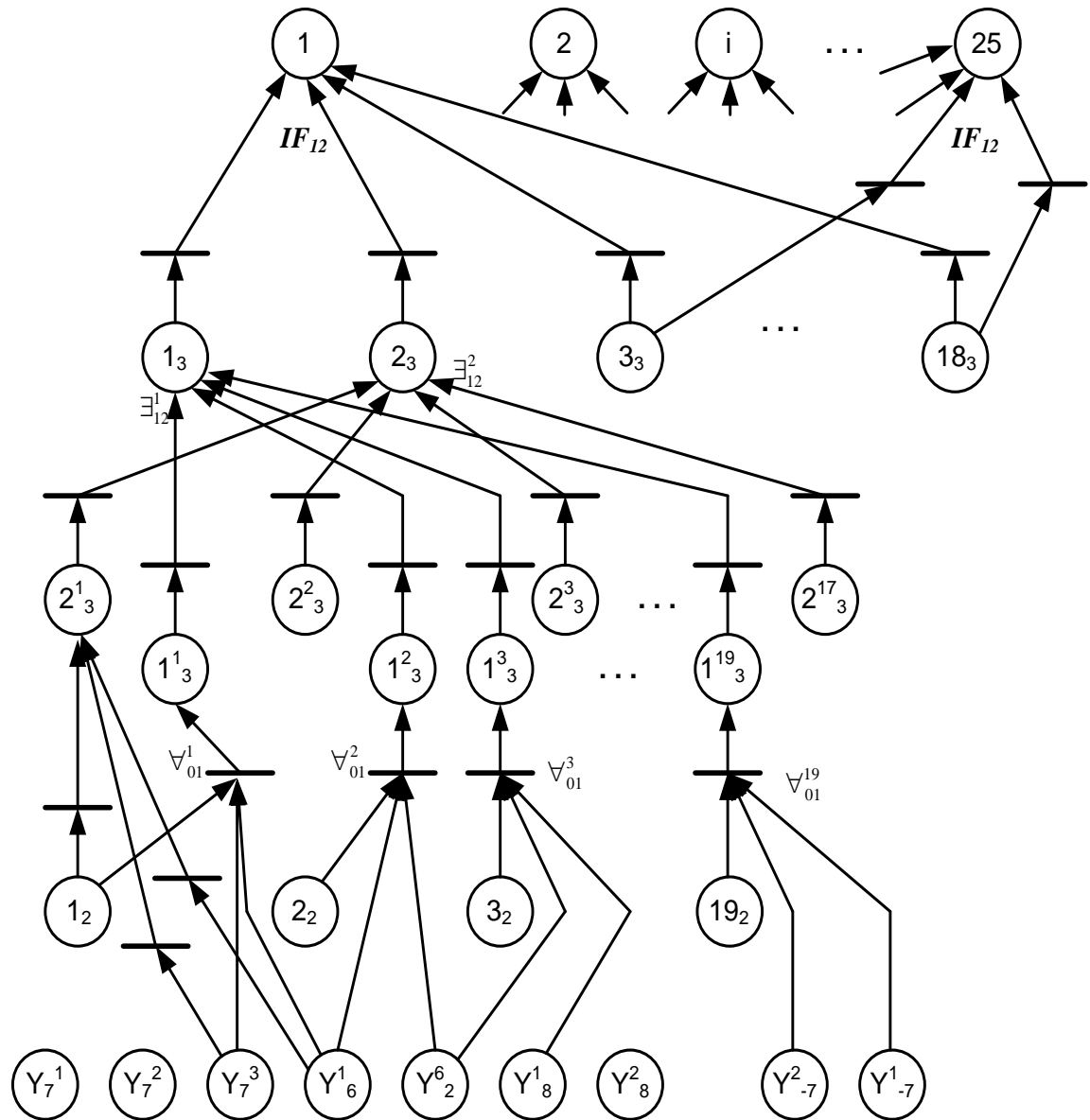


Рис. 4.7. Структура для обчислення ВІДСТАНІ η_3

Таким чином, за правилами (4.8) і (4.9) знаходяться параметри $\underline{\eta}_1, \underline{\eta}_2, \dots, \underline{\eta}_5$ ЛДМ (4.7), значення яких відповідає реальному розташуванню РО на момент часу ухвалення глобального диспетчерського керування. При цьому виконується наступний ланцюг обчислень. На основі точної інформації про проходження РО контрольних точок і інтервалів реального часу знаходиться нечітке розташування РО з точністю до перегонів між зупинками. Це здійснюється за правилами. На основі цього нечіткого розташування за правилами (4.8) і (4.9) знаходиться нечіткий розподіл РО відносно першої РО у квантах модельного часу t . І, нарешті, на останньому третьому кроці, здійснюється дефазифікація нечітких множин з використанням правил [161].

4.3.2. Правила формування керуючих дій

Результати роботи ЛДМ (результати моделювання пересування РО по всій мережі маршрутів, що буде розглянуто в розділі 5) входять в (4.3) і (4.5). Дані значення необхідно відобразити в швидкості пересування відповідних РО, що рекомендуються, на відповідних η_2 ділянках η_3 маршруту. Як показано в [163], рекомендована швидкість РО може передатися у вигляді трьохелементної λ_i виродженої нечіткої множини ШВИДКІСТЬ = {мала $\lambda_1|1$, середня $\lambda_2|1$, велика $\lambda_3|1$ }. Дана відповідність встановлюється за допомогою правил БДЗ_2. Для цього вироджені нечіткі множини, з якими працює ЛДМ, необхідно відобразити в нечіткі множини ШВИДКІСТЬ. Поставимо у відповідності до елементів множини ШВИДКІСТЬ = {мала, середня, велика} елементи множини λ_i . Тоді механізм відображення буде тривіальним і правила з БДЗ_2 набудуть вигляду

$$\underline{P} = \left\{ {}^0C_1^3 = \{ \lambda_1 | 1, \lambda_2 | 1, \lambda_3 | 1, \}, \underline{IF}_{01} \right\},$$

			мала	середня	велика
де	$\underline{IF}_{01} =$	λ_1	1.0	0.0	0.0
		λ_2	0.0	1.0	0.0
		λ_3	0.0	0.0	1.0

4.3.3. Розроблення моделі виробничої ситуації у системі ситуаційного керування швидкістю розпуску поїздів

Концепція ситуаційного керування швидкістю розпуску поїздів на сортувальних станціях подана в [160]. В основу підходу покладено принцип автоматичного формування моделі ситуації в реальному часі за декларативними правилами, що формалізують знання про структуру об'єкта. Модель представлення декларативних правил і процедура автоматичного формування цієї моделі надані в [161, 166]. Нижче наводяться приклади моделей фрагментів ситуації і декларативних правил автоматичного представлення моделі поточної ситуації.

Структура моделі ситуації. На підставі аналізу виділені такі фрагменти, об'єднання яких являє модель повної виробничої ситуації: $C = \{C^1, C^2\}$, де C^1 - модель фрагмента ситуації, що характеризує відчепи; C^2 - модель фрагмента ситуації, що характеризує стан оточення. Модель є повною, з погляду задачі керування швидкістю відчепів шляхом уповільнення їх руху на гальмівних позиціях. Конкретизація кожного фрагмента дає:

$$\begin{aligned}
\tilde{C}^1 = & \left\{ \left(\tilde{C}^{11i} = \left\{ \tilde{C}^{11i} \right\}_{i=1}^k \right), \right. \\
& \left(\tilde{C}^{12} = \left\{ \tilde{C}^{12i} \right\}_{i=1}^k \right), \left(\tilde{C}^{13} = \left\{ \tilde{C}^{13i} \right\}_{i=1}^k \right), \\
& \left(\tilde{C}^{14} = \left\{ \tilde{C}^{14i} \right\}_{i=1}^k \right), \left(\tilde{C}^{15} = \left\{ \tilde{C}^{15i} \right\}_{i=1}^k \right), \\
& \left(\tilde{C}^{16} = \left\{ \tilde{C}^{16i} \right\}_{i=1}^k \right), \left(\tilde{C}^{17} = \left\{ \tilde{C}^{17i} \right\}_{i=1}^k \right), \\
& \left. \left(\tilde{C}^{18} = \left\{ \tilde{C}^{18i} \right\}_{i=1}^k \right) \right\}. \\
\tilde{C}^2 = & \left\{ \left(\tilde{C}^{21} = \left\{ \tilde{C}^{21i} \right\}_{i=1}^e \right), \right. \\
& \left(\tilde{C}^{22} = \left\{ \tilde{C}^{22i} \right\}_{i=1}^e \right), \left(\tilde{C}^{23} = \left\{ \tilde{C}^{23i} \right\}_{i=1}^e \right), \\
& \left. \left(\tilde{C}^{24} = \left\{ \tilde{C}^{24i} \right\}_{i=1}^e \right), \left(\tilde{C}^{25} = \left\{ \tilde{C}^{25i} \right\}_{i=1}^e \right) \right\}.
\end{aligned}$$

Де для i -го відчепа:

\tilde{C}^{11i} – поточна швидкість скочування;

\tilde{C}^{12i} – маса;

\tilde{C}^{13i} – довжина;

\tilde{C}^{14i} – ходові характеристики;

\tilde{C}^{15i} – геометричні характеристики;

\tilde{C}^{16i} – вміст вагонів ;

\tilde{C}^{17i} – дистанція від i -го відчепа до найближчого, який знаходиться

попереду;

\tilde{C}^{18i} – координати місцезнаходження;

k – кількість відчепів;

\tilde{C}^{21i} –заповнення i -ої підгіркової колії;

\tilde{C}^{22i} – характеристика «вікон» на i -ій підгірковій колії;

\tilde{C}^{23i} –статичний опір руху відчепів на i -ій підгірковій колії;

\tilde{C}^{24i} –технічний стан i -ої підгіркової колії;

\tilde{C}^{25i} – стан атмосфери (сила і напрям вітру, температура, вологість, обмерзання) i -ої підгіркової колії.

Кожний з вказаних фрагментів являє складну багаторівневу структуру нечітких множин, які формуються в реальному часі за декларативними правилами. Функції приналежностей нечіткої множини нижнього рівня формуються контрольно-вимірювальними приладами і пристроями введення інформації; верхніх рівнів, що характеризують стан об'єкта і оточення, у вигляді деяких понять і узагальнень, всі вони відповідають декларативним правилам. Серед перерахованих фрагментів є однорівневі, наприклад, маса і координати i -го відчепа; дворівневі прості моделі, наприклад, швидкість, довжина, дистанція i -го відчепа, і багаторівневі складні структури.

Однорівневі фрагменти \tilde{C}^{12i} , \tilde{C}^{18i} формуються безпосередньо драйверами пристроїв введення інформації: електронними вагами ($\tilde{C}^{12i}=\{\text{легкий}/0, \text{середній}/1, \text{важкий}/0, \text{дуже_важкий}/0\}$), датчиками положення відчепів щодо відповідної гальмівної позиції (ГП) ($\tilde{C}^{18i}=\{\text{ГП_1}/0;\text{ГП_2}/1;\text{ГП_3}/0\}$).

Дворівневі фрагменти, наприклад, C^{11i} подані у вигляді лінгвістичних змінних (нечіткої множини другого рівня).

$C^{11i} = \{\text{дуже_мала}/1,0; \text{ мала}/0,9; \text{ середня}/0,15; \text{ велика}/0; \text{ дуже_велика}/0\}$. Декларативні правила формування в реальному часі нечіткої множини другого рівня мають вигляд [166], наприклад, для фрагмента C^{11i}

$$\tilde{\Pi}_1^{11i} = \left\{ \left({}^0 \hat{C}^{11i} = \{s_1|1, s_2|1, \dots, s_{20}|1\} \right), IF_{01}^{11i} \right\},$$

де s_i - діапазон швидкості (наприклад 1,0 м/с, 1,5 м/с), формований драйвером вимірювача швидкості в контрольній точці маршруту.

	дуже малий	малий	середній	великий	дуже_великий
S_1	0,95	0,55	0,15	0,0	0,0
S_2	0,85	0,65	0,2	0,05	0,0
$IF_{01}^{11i} = S_3$	0,45	0,95	0,45	0,15	0,0
:					
S_{20}	0,0	0,0	0,15	0,85	1,0

Багаторівневі фрагменти розглянемо на прикладі C^{22i} . Побудова моделі фрагмента ситуації базується на первинній інформації, що надходить від системи контролю заповненої колії (КЗШ) [165], яка через пристрої введення інформації формує множину

$$\tilde{{}^0 C}^{22i} = \{s_1|\mu_1, s_2|\mu_2, \dots, s_{15}|\mu_{15}\},$$

де $\mu_i=1$, якщо i -та рейкова ділянка зайнята і $\mu_i=0$ в протилежному випадку. Структура фрагмента ситуації «вікна» може бути подана, як показано на рис.4.8.

На рис. 4.8 позначені елементами $w_{1_2}, w_{1_3}, \dots, w_{1_{13}}$,— «вікна» завдовжки в одну рейкову ділянку з початком на 2-ій, 3-ій і так до 13-ої рейкової ділянки, аналогічно $w_{2_2}, \dots, w_{2_{12}}, w_{3_2}, \dots, w_{3_{11}}$...— вікна завдовжки в дві, три і так до 11-ої ділянки з початком на 2-ій, 3-ій і

інших ділянках. Елементи w_1, w_2, \dots, w_{12} описують факт наявності хоча б одного вікна завдовжки в одну, дві і більше ділянок. На цих елементах побудовано поняття мале, середнє і велике «вікно» на i -ій підгірковій колії.

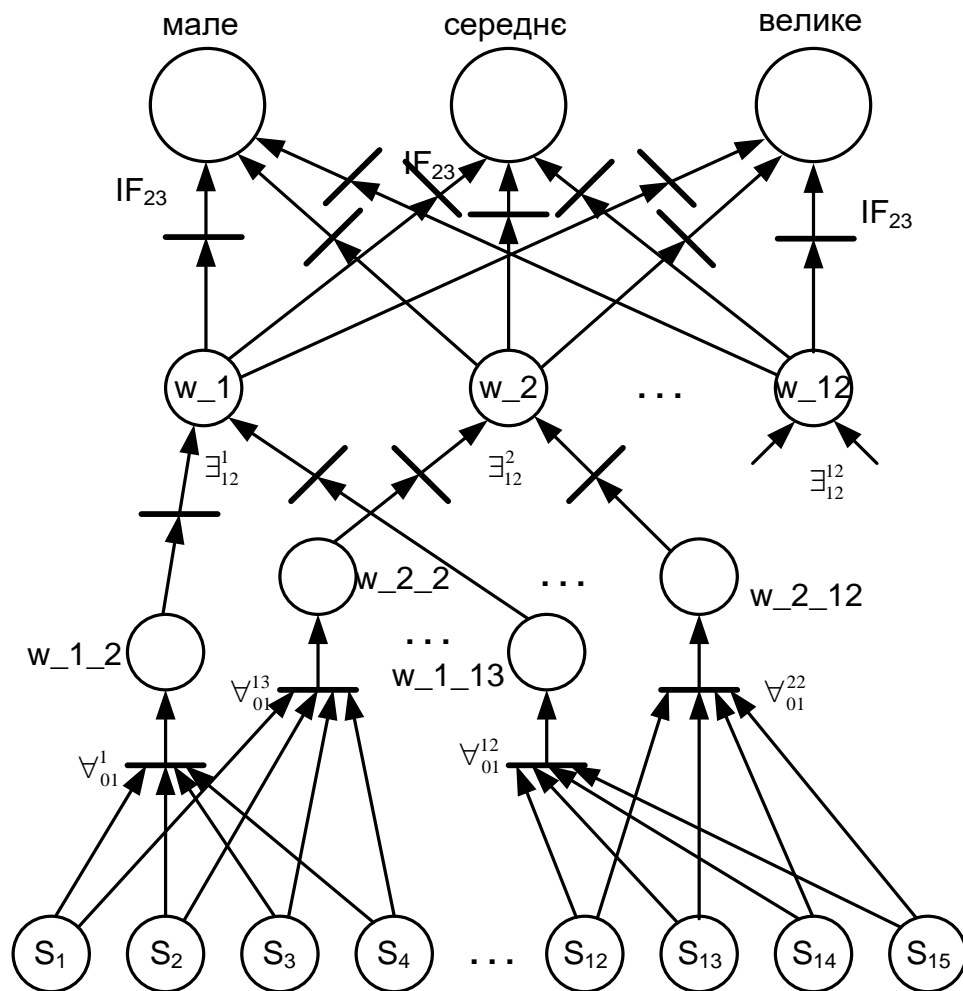


Рис.4.8. Структура МП для фрагмента ситуації «вікно»

Розглянемо структуру цього фрагмента ситуації з урахуванням збоїв у системі КЗШ. Ідентифікацію збоїв в системі КЗШ пропонується виконувати на основі динаміки змін показників датчиків у процесі скочування відчепа. Для цього з кожним елементом S_i пов'яжемо елемент σ_i , функція приналежності якого $\mu(\sigma_i)$, характеризує швидкість зміни функції приналежності $\mu(S_i)$. На рис.4.9,*a* показаний вигляд $\mu(S_i)$ при проходженні i -ої ділянки одиночним відчепом, а на рис.4.8,*б* – вигляд $\mu(\sigma_i)$, пропонований для вирішення поставленої задачі.

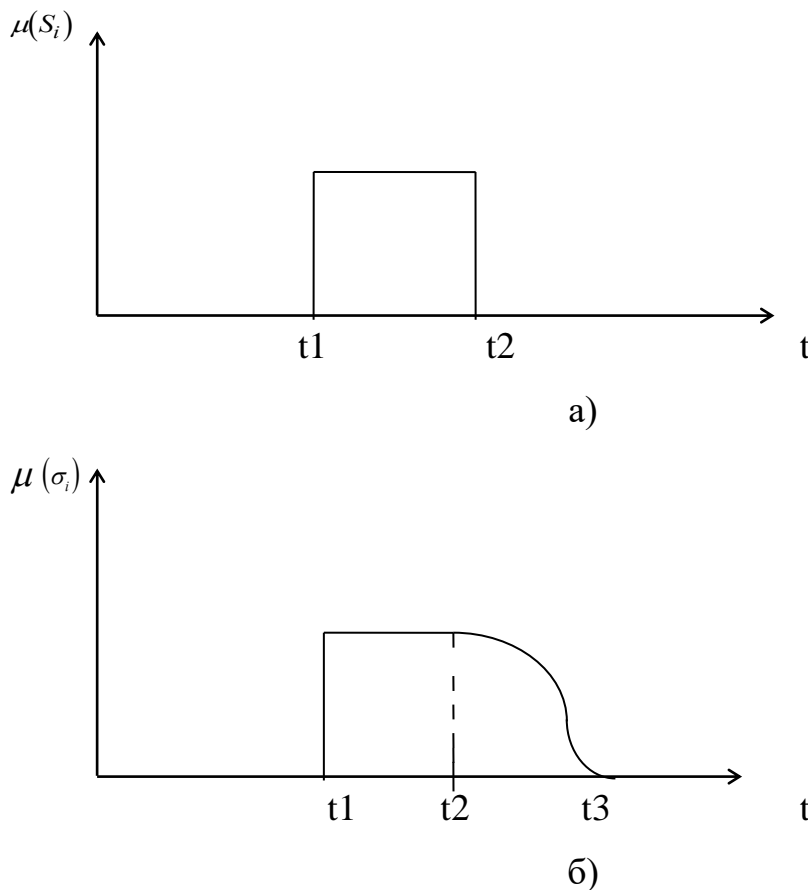


Рис.4.9. Залежність функцій приналежності $\mu(S_i)$, $\mu(\sigma_i)$

Метод ідентифікації збоїв базується на аналізі $\mu(s_i)$, $\mu(\sigma_i)$ трьох суміжн их ділянок. На рис.4.10 наведена структура обчислювання нечіткої множини $\tilde{G} = \{G_1 | \mu(G_1), \dots, G_{15} | \mu(G_{15})\}$, що характеризує правильність роботи системи КЗШ на i -ій ділянці.

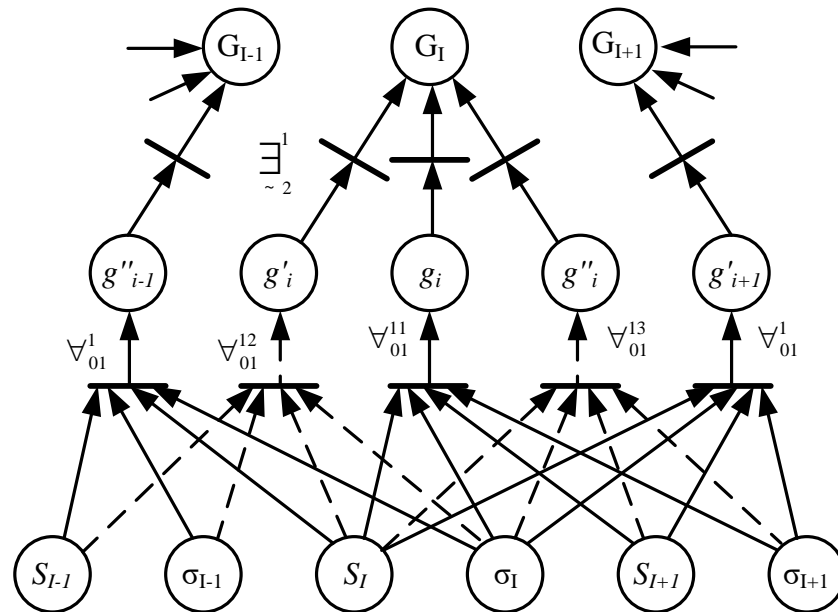


Рис.4.10. Структура фрагмента «працездатності» системи КЗШ

Правила формування нечіткої множини \tilde{G} такі

$$\begin{aligned} \tilde{\Pi}_1^{22i} &= \left\{ \left(\hat{\tilde{C}}_1^{22i} = \{g_i | 0, g_i^\circ | 0, g_i^{\circ\circ} | 1\}, \exists_{12} \right) \right. \\ &\quad \left(\hat{\tilde{C}}_{\sim 1}^{22i} = \{s_i | 1, \sigma_i | 1, s_{i+1} | 1; \sigma_{i+1} | 0\}, \nabla_{\sim 01}^{i1} \right), \\ &\quad \left. \left(\hat{\tilde{C}}_{\sim 3}^{22i} = \{s_i | 1, \sigma_i | 1, s_{i+1} | 0; \sigma_{i+1} | 0\}, \nabla_{\sim 01}^{i3} \right) \right\}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Звернемо увагу на особливість обробки правила (4.10). В ньому використовуються елементи σ_i , що відображають динаміку зміни функції

приналежності елементів s_i . Тому правило «спрацює» правильно тільки на ділянках часу $[t1, t2]$ або $[t2, t3]$ (рис. 4.9). Це означає, що правило повинне оброблятися по перериваннях.

З урахуванням надійності роботи системи КЗШ структура фрагмента ситуації \tilde{C}^{22i} , наведена на рис.4.8, буде доповнена підструктурою, наведеною на рис. 4.11, яка формує факти наявності конкретних вікон w_{1_2} . Декларативне правило, що формує в реальному часі w_{1_2} , має вигляд

$$\Pi = \left\{ \left(\hat{C}^1 = \left\{ s_{-g_1/1}, s_{-g_2/0}, s_{-g_3/1} \right\}, \forall_{12}^1 \right) \right.$$

$$\left. \left\{ \left(\hat{C}^2 = \left\{ s_1|1, \sigma_1|0 \right\}, \forall_{01}^1 \right), \left(\hat{C}^3 = \left\{ s_2|1, \sigma_2|0 \right\}, \forall_{01}^2 \right), \right. \right.$$

$$\left. \left. \left(\hat{C}^4 = \left\{ s_3|1, \sigma_3|0 \right\}, \forall_{01}^3 \right) \right\} \right.$$

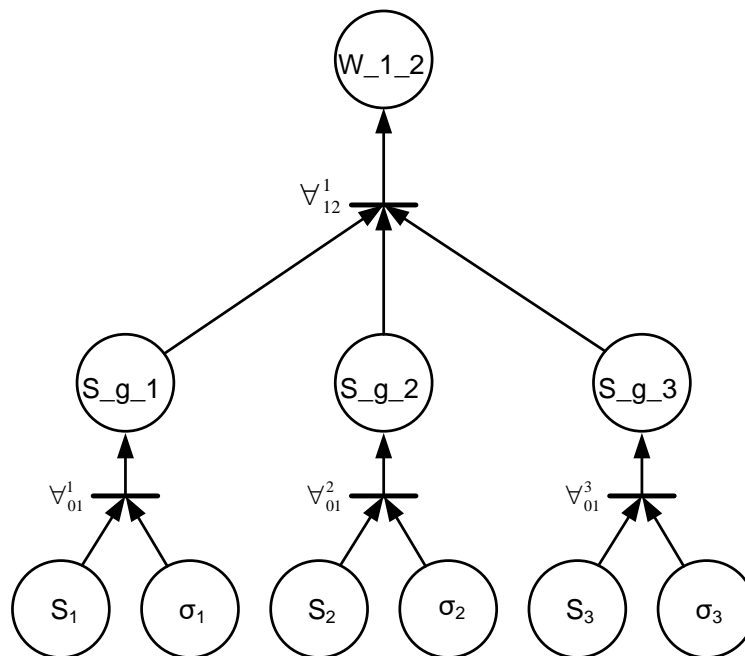


Рис.4.11. Приклад структури «вікно w_{1_2} »

У додатку Б наведений приклад розроблення моделі ситуаційної системи керування гальмівною позицією на спускній частині гірки за допомогою інтегрованого середовища MatLab 6.5.

Приклад програмної організації ситуаційних систем наданий у додатку В

Висновки

1. Запропоновано організацію декларативної бази знань ситуаційної підсистеми диспетчерського керування рухом рейкових транспортних засобів на основі сукупності продукційних правил оцінки поточної ситуації, правил оцінки та формування узагальненої модельної ситуації, правил формування керування.
2. Розроблено концептуальні положення щодо організації підсистем ситуаційного диспетчерського керування і формування керуючих дій на прикладі Харківського вузла Південної залізниці, виконано структурування підсистем, сформовані фрагменти ситуацій.
3. Обґрунтовано метод єдиного формального опису руху окремих рухомих одиниць на основі локальних моделей та сукупності рухомих одиниць на основі глобальної моделі. Запропоновано моделі різних маршрутів, які функціонують у реальному часі. Моделі побудовані із використанням мереж Петрі, операторів зсуву Z^{-1} , Z - перетворення та враховують динаміку руху.
4. Розроблено моделі виробничих ситуацій у підсистемі ситуаційного керування швидкістю розпуску поїздів які враховують розміщення всіх РО на маршрутній мережі, зміну відстані і вікон між РО, а також розподіл конкретних РО на окремих маршрутах в дискретні моменти часу.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ СИТУАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО КЕРУВАННЯ РУХОМИМИ ОДИНИЦЯМИ РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ

Відомо три підходи до організації системи диспетчерського керування рухом (СДКР) [159-166]: попереднє складання розкладу руху з наступним контролем і регулюванням руху традиційними методами (перший підхід), ситуаційне регулювання заздалегідь складеного графіка руху (другий підхід) і ситуаційне планування руху й прийняття диспетчерського керування в реальному часі (третій підхід).

Нижче для організації системи диспетчерського керування обраний третій підхід.

5.1. Принципи організації ситуаційної системи диспетчерського керування

Структуруємо модель ситуації шляхом виділення в ній фрагментів за ознакою джерела інформації, використовуюваної при її формуванні.

Ситуація C складається з таких фрагментів:

$$C = \{C^1, C^2, C^3, C^4, C^5\}, \quad (5.1)$$

де $C^1 = \{C_1^1, C_2^1, \dots, C_k^1\}_j$ - фрагмент, що описує місцезнаходження (в системі координат маршрутів) у всіх рухомих одиниць;

C_i^1 - координата i -ої РО;

$C^2 = \{C_1^2, C_2^2, \dots, C_k^2\}$ - фрагмент, що описує наповнення, наприклад, C_i^2 - наповнення i -ої РО;

$C^3 = \{C_1^3, C_2^3, \dots, C_k^3\}$ - фрагмент, що характеризує технічний стан РО;

$C^4 = \{C_1^4, C_2^4, \dots, C_n^4\}$ - фрагмент, що характеризує кількість пасажирів, наприклад, C_i^4 - на i -тій зупинці;

$C^5 = \{C_1^5, C_2^5, \dots, C_m^5\}$ - фрагмент, що характеризує технічний і колійний стан ділянок маршруту, наприклад, C_i^5 - i -ої ділянки маршруту.

Якість диспетчерського керування, наприклад рухом пасажирських поїздів, оцінюється суперечливими величинами:

R_1 - змінні (добові) пасажироперевезення;

R_2 - комфортність пасажирів;

R_3 — безпека перевезень;

R_4 — енерговитрати на перевезення;

R_5 — вартість перевезення на одного пасажирів;

R_6 — запропонований у розд.2 критерій правильності прийняття

оперативних рішень.

Множина диспетчерських впливів на об'єкт керування:

$$U = \{U_1, U_2, \dots, U_k\}, \quad (5.2)$$

де U_j — керуюча дія щодо j -ої РО

Розглянемо процес диспетчерського керування в часі. Нехай $t, t+\Delta, t+2\Delta, \dots, t+k\Delta, \dots$ дискретні моменти часу $t_j = t + j\Delta$ прийняття диспетчерського керування. У довільний момент часу t_k стан об'єкта керування описується поточною ситуацією

$$\underline{C}_j = \{\underline{C}_j^1, \underline{C}_j^2, \underline{C}_j^3, \underline{C}_j^4, \underline{C}_j^5\}, \quad (5.3)$$

де \underline{C}_j^i — модель фрагмента ситуації C^i в момент часу t_j .

Диспетчерське керування в кожен момент часу може прийматис за всіма РО, тобто

$$\underline{U}_j = \{\underline{U}_{1j}, \underline{U}_{2j}, \dots, \underline{U}_{kj}\}. \quad (5.4)$$

Множину керувань (5.4) можна розбити на дві групи: \underline{U}'_j - керування, що приймаються до групи РО, які перебувають на кінцевих диспетчер-

ських пунктах на момент часу t_j ; \underline{U}''_j — керування, які приймаються до РО, котрі перебувають на маршрутах.

Нехай

$$\underline{C}_{ij}^1 = \{ \underline{C}_{i_1j}^1, \underline{C}_{i_2j}^1, \dots, \underline{C}_{i_{Lj}^1} \} \subset \underline{C}_{1j}, \quad (5.5)$$

фрагмент ситуації РО, що перебувають на i -му кінцевому пункті, $i = \overline{1, L}$, де L — кількість кінцевих пунктів маршрутів. Вектор керування U_{ij} для цих РО трикоординатний: $U_{ij} = \{U'_{ij}, U''_{ij}, U'''_{ij}\}$, де $U'_{ij} = 1$ — випустати РО на маршрут і $U'_{ij} = 0$ не випустати; U''_{ij} — номер маршруту, за яким РО випускається; U'''_{ij} — швидкість, яка рекомендована на маршруті.

Вектор керування $\underline{U}_{ij} \in U''_j$ — однокоординатний, являє собою необхідну швидкість.

Завдання ситуаційної системи полягає в тому, щоб для кожного моменту часу t_j знайти керуючі дії

$$\underline{U}_j = F(\underline{C}_j) \quad (5.6)$$

такі, що $R_m(U_{j_1}, U_{j_2}, \dots, U_{j_s}) \subset \hat{R}_m, m = \overline{1, s}$,

де S — кількість моментів прийняття керування за зміну (добу).

Традиційний підхід у ситуаційному керуванні [161,166] до знаходження \underline{U}_j в (5.6) полягає в тому, що множина правил

$$\Pi = \{\Pi_i\}_{i=1}^m, \quad (5.7)$$

де \underline{C}^i - i -ий фрагмент-еталон моделі ситуації;

\underline{U}^i - i -ий фрагмент керуючих впливів,

зіставляється з моделлю поточної ситуації, і, як правило, збігається з відповідним фрагментом моделі поточної ситуації \underline{C}^j , за якою формується керування \underline{U}^i . Проблематичність застосування підходу в такій інтерпретації полягає в наступному.

По-перше, керування $U_{ij} \in \underline{U}'_j$ мають глобальний характер, тому що вони в істотній мірі залежать від розвитку всіх ситуацій на маршрутах, а $U_{ij} \in \underline{U}''_j$ — локальний характер, оскільки вони тільки корегують фрагмент ситуації на локальній ділянці маршруту. Таким чином, об'єкт керування описується складною моделлю повної ситуації (5.3), а правила (5.7) охоплюють лише невеликий фрагмент \underline{C}^i загальної ситуації, і на базі останніх можна формувати локальні керування $U_{ij} \in \underline{U}''_j$.

По-друге, керування (5.6) не може одночасно задовольняти всі критерії зазначені вище. База знань Π може бути розбита на підмножини, кожна з яких містить правила керування, що задовольняють окремі критерії. Пошук компромісного керування можливий шляхом оцінки варіантів траєкторії зміни ситуації за кожним критерієм і вибору найбільш доцільного.

По-третє, глобальні керування $U_{ij} \in \underline{U}'_j$ можуть бути ефективними, якщо «переглянути» у часі наслідки їхнього застосування до поточної ситуації.

З метою подолання зазначених труднощів ситуаційного керування пропонується гібридний підхід, який включає:

1. Формування моделі поточної ситуації в реальному часі.
2. Реалізація для локального керування ($U_{ij} \in \underline{U}''_j$) ситуаційного керування реального часу (формування диспетчерського керування шляхом застосування знань (5.7) до поточної ситуації (5.3)).
3. Використання для глобального керування ($U_{ij} \in \underline{U}'_j$) «швидкого» прогнозування розвитку ситуації шляхом ситуаційного моделювання, яке спирається на оцінку прогнозованих ситуацій за правилами й прийняття керування на основі «гарних» варіантів.

Стосовно до завдання диспетчерського керування деталізація підходу полягає в наступному. У кожен момент прийняття диспетчерського керування:

1. За декларативними правилами формується повна модель поточної ситуації.

2. За правилами для кожної РО формується локальне керування.

3. Для кожного кінцевого пункту маршрутів за продукційними правилами переваги маршруту з множини (5.5) вибирається РО, за якою приймається модельне (пробне) керування $(U_{ij}|1, \mu(U_{ij})=1)$ - випустити РО на маршрут.

4. Використовуючи модель повної ситуації (5.3), за декларативними правилами формується узагальнена модель ситуації, що відображає вузлові (критичні) ділянки маршрутів.

5. На основі узагальненої моделі ситуації за продукційними правилами, що відображає нечітку зміну положення РО по різних маршрутах, моделюється розвиток у часі поточної ситуації.

6. Для кожного кроку модельного часу за правилами перевіряється модельна ситуація на критичних ділянках маршрутів. Якщо при моделюванні РО проходить всі критичні ділянки й при цьому не виникає небажаних ситуацій, то приймається необхідне керування в реальному часі.

З метою економії обчислювальних ресурсів, що є головним чинником для систем реального часу, процедура виконується не для всіх моментів t_j й одночасно розглядаються не всі кінцеві пункти. Моделювання починається з моменту реального часу, коли на кінцевий пункт прибуває чергова РО, а потім на кожному інтервалі реального часу Δ вирішується завдання, поки РО не буде направлена на маршрут. Фактично при такому підході визначається момент часу t_j , коли можна випустити на маршрут РО. Правила, що перевіряють при моделюванні розвиток ситуацій у часі, враховують критерії оцінки якості керування.

5.2. Концепція побудови моделі інтегрованої системи ситуаційного моделювання й керування

Відповідно до класифікації систем ситуаційного керування (ССК) реального часу [160], система диспетчерського керування рейковим транспортом може бути віднесена до інтелектуальних ССК, які мають механізм прогнозування (на основі моделювання) розвитку поточної ситуації для різних варіантів керування.

Нижче дається формалізація цього класу систем.

Модель ССК може бути надана у вигляді

$$\langle \text{БД, БДЗ, БПЗ, И}_d, \text{И}_n, \text{запит, ціль} \rangle, \quad (5.8)$$

де БД — база даних, у якій у кожен момент реального часу t зберігається модель ситуації;

БДЗ, БПЗ — декларативна й продукційна бази знань. Перша містить правила, за якими у реальному часі генерується модель поточної ситуації. Друга містить продукційні правила, за якими формуються керування;

$\text{И}_d, \text{И}_n$ — інтерпретатори декларативних і продукційних правил.

Конкретизуємо модель (5.8) для випадку інтегрованої ССК.

База даних БД визначена на множині елементів:

$$C = \{ \{ \{ {}^0 C^i \}_{i=1}^5, \{ {}^1 C^i \}_{i=1}^5, \dots, \{ {}^k C^i \}_{i=1}^5 \} \cup C \}, \quad (5.9)$$

де ${}^0 C^i$ — множина елементів, на яких будується фрагмент C^i із (5.1), функції приналежностей яких формуються безпосередньо датчиками або іншими контрольно-вимірювальними приладами. Наприклад, функції приналежностей $\mu(c)$, $c \in {}^0 C^1$ формуються первинними датчиками положення РО.

$C_{pe}^i = \{ {}^1 C^i, {}^2 C^i, \dots, {}^n C^i \}$, — $n < k$ множина елементів, на яких будується фрагмент ситуації C^i із (5.1), функції приналежностей яких формуються за декларативними правилами. Фрагмент C_{pe}^i описує поточну ситуацію на різних рівнях узагальнення. Модель ситуації цих рівнів використовується

при формуванні в реальному часі локальних диспетчерських керувань. Наприклад, ${}^2C^i$ описує нечітке положення РО в довільний момент часу між двома пунктами знімання інформації.

$C_{мв}^i = \{ {}^{n+1}C^i, {}^{n+2}C^i, \dots, {}^k C^i \}$ — множина елементів, на яких за декларативними правилами будується модель ситуації фрагмента C^i більш високого рівня узагальнення. Ця модель ситуації реалізується механізмом моделювання розвитку ситуації в модельному часі.

${}^u C$ — множина елементів, на яких формується модель диспетчерських керувань. Функції приналежностей $\mu(c)$, $c \in {}^u C$ формуються за продукційними правилами.

Модель поточної ситуації в момент реального часу t , — це нечітка множина:

$$\underline{C}_p = \{ {}^0 \underline{C}, \underline{C}_{p\%}, {}^u \underline{C} \}, \quad (5.10)$$

$$\text{де } {}^0 \underline{C} = \{ {}^0 \underline{C}^i \}_{i=1}^5; \underline{C}_{p\%} = \{ {}^1 \underline{C}^i, {}^2 \underline{C}^i, \dots, {}^n \underline{C}^i \}_{i=1}^5.$$

Модель поточної ситуації в момент модельного часу T , відлік якого початий від моменту t реального часу — це нечітка множина

$$\underline{C}_m = \{ \underline{C}_{m\%} = \{ {}^{n+1} \underline{C}^i, {}^{n+2} \underline{C}^i, \dots, {}^k \underline{C}^i \}_{i=1}^5 \}. \quad (5.11)$$

Декларативна база знань містить множину правил:

$$P^\delta = \{ P_{p\delta}^\delta, P_{m\delta}^\delta \}, \quad (5.12)$$

де $P_{p\delta}^\delta$ — правила, за якими у реальному часі формується модель ситуації

$$\underline{C}_p;$$

$P_{m\delta}^\delta$ — правила, за якими у модельному часі формується модель ситуації

$$\underline{C}_m.$$

Структура правил $P^j \in P^\delta$ складемо згідно з [161,166]:

$$P^j = \{ (\hat{\underline{C}}_1^{l-1}, \exists_{01..l}^1), (\hat{\underline{C}}_2^{l-1}, \exists_{01..l}^2), \dots, (\hat{\underline{C}}_n^{l-1}, \exists_{01..l}^n), \quad (5.13)$$

$$(\hat{\underline{C}}_{n+1}^{l-1}, \forall_{01..l}^1), (\hat{\underline{C}}_{n+2}^{l-1}, \forall_{01..l}^2), \dots, (\hat{\underline{C}}_{n+m}^{l-1}, \forall_{01..l}^m),$$

$$\begin{aligned}
& (\hat{C}_{n+m+1}^{l-1}, \underline{IF}_{01.l}^1), (\hat{C}_{n+m+2}^{l-1}, \underline{IF}_{01.l}^2), \dots, (\hat{C}_{n+m+r}^{l-1}, \underline{IF}_{01.l}^r), \\
& (\hat{C}_1^0, \exists_{01}^1), (\hat{C}_2^0, \exists_{01}^2), \dots, (\hat{C}_n^0, \exists_{01}^n), \\
& (\hat{C}_{n+1}^0, \forall_{01}^1), (\hat{C}_{n+2}^0, \forall_{01}^2), \dots, (\hat{C}_{n+m}^0, \forall_{01}^m), \\
& (\hat{C}_{n+m+1}^0, \underline{IF}_{01}^1), (\hat{C}_{n+m+2}^0, \underline{IF}_{01}^2), \dots, (\hat{C}_{n+m+r}^0, \underline{IF}_{01}^r);
\end{aligned}$$

$$0 < l \leq k;$$

\hat{C}_i^j — нечіткі множини еталонів фрагментів ситуації, задані на множині елементів C^j ;

$\exists_{01.i}^j, \forall_{01.i}^j, \underline{IF}_{01.i}^j$ — нечіткі відношення, задані на перетинанні множин $\{C_0, C_1, \dots, C_{i-1}\} \times C_i$.

У (5.5) введено три типи відношень між елементами множин C .

Відношення “хоча б один елемент” — \exists . Нехай $C^a \subset C_0$ і $C^b \subset C_1$ — два фрагменти множин, що перебувають у відношенні \exists . Для них повинні виконуватися умови:

$$1. \text{ При } \text{SOM}^\alpha(\underline{C}^A, \underline{C}_o) \neq 0 \text{ фрагмент } \underline{C}^B = \{C/1, \forall c \in C^B\}; \quad (5.14)$$

$$2. \text{ При } \text{SOM}^\alpha(\underline{C}^A, \underline{C}_o) = 0 \text{ фрагмент } \underline{C}^B = \{C/0, \forall c \in C^B\},$$

де $\text{SOM}^\alpha(\underline{C}, \underline{C}^1)$ — спільність α -рівня двох нечітких множин $\underline{C}, \underline{C}^1$,

найближчих за α -рівнем до нечітких множин.

$$\text{SOM}^\alpha(\underline{C}, \underline{C}^1) = \{C' / \forall c \in C : \mu(c) = \mu_{\rho_\alpha}(c) = 0\} = \{C/1 \forall c \in C', C/0 \forall c \notin C'\};$$

$\rho_\alpha(\underline{C}, \underline{C}^1)$ — ступінь близькості двох кінцевих множин $\underline{C}, \underline{C}^1$ за α -

рівнем:

$$\rho_\alpha(\underline{C}, \underline{C}^1) = |\underline{C} - \underline{C}^1|_\alpha;$$

$|\underline{C} - \underline{C}^1|_\alpha$ — абсолютна різниця двох нечітких множин $|\mu_{\underline{C}}(c) - \mu_{\underline{C}^1}(c)|$.

Нечітка множина \underline{C}^B , індукована відношенням \exists , така:

$$\underline{C}^B = \exists_{C_0 C_1} \overline{[\rho_\alpha(\underline{C}^A, \underline{C}_o)]}, \quad (5.15)$$

$$\text{де } \mu_{\underline{C}^B}(c) = \begin{cases} \max_{c \in \exists^{-1}} [\mu_{\rho_\alpha}(c)], & \text{якщо } \exists^{-1}\{C\} \neq 0; \\ 0, & \text{якщо } \exists^{-1}\{C\} = 0; \end{cases}$$

\exists, \exists^{-1} - відображення (пряме й зворотне), задані на C .

Відношення “всі елементи” \forall . Візьмемо дві звичайні множини C_0 і C_1 . Фрагменти $C^A \subset C_0$ й $C^B \subset C_1$ перебувають у відношенні \forall , якщо виконується умова:

1. При $SOM^\alpha(\underline{C}^A, \underline{C}) = C^A$ фрагмент $\underline{C}^B = \{C/1, \forall c \in C^B\}$;
2. При $SOM^\alpha(\underline{C}^A, \underline{C}) \neq C^A$ фрагмент $\underline{C}^B = \{C/0, \forall c \in C^B\}$.

Нечітка множина \underline{C}^B , індукована відношенням \forall , така

$$\underline{C}^B = \hat{\exists}_{C_0 C_1} [\overline{\rho_\alpha(\underline{C}^A, \underline{C}_0)}], \quad (5.16)$$

$$\text{де } \mu_{\underline{C}^B}(c) = \begin{cases} \min_{c \in \forall^{-1}} [\mu_{\rho_\alpha}(c)], & \text{якщо } \forall^{-1}\{C\} \neq \emptyset; \\ 0, & \text{якщо } \forall^{-1}\{C\} = \emptyset. \end{cases}$$

Відношення “умовна множина” – IF . Нехай C_0, C_1 — дві звичайних множини. Фрагмент $C^B \subset C_1$ назвемо умовним на $C^A \subset C_0$, якщо його функції приналежностей залежать від \exists , як від параметра

$$\mu_{\underline{C}^B}(c) = \mu_{IF}(C^B // C^A).$$

Нечітка множина, індукована відношенням IF , така:

$$\underline{C}^B = \underline{IF}_{C_0 C_1} [\overline{\rho_\alpha(\underline{C}^A, \underline{C}_0)}], \quad (5.17)$$

$$\text{де } \mu_{\underline{C}^B}(c) = \max_{c \in C_0} (\min[\mu_{IF}(C^B // C^A), \mu_{\rho_\alpha}(C^A, C_0)]);$$

$$\underline{IF}_{C_0 C_1} = \begin{array}{c|ccc} C^A \setminus C^B & C_1 & C_2 & C_m \\ \hline C_1 & \mu(C_1, C_1) & \mu(C_1, C_2) \dots \mu(C_1, C_m) & \\ C_2 & \mu(C_2, C_1) & \mu(C_2, C_2) \dots \mu(C_2, C_m) & \\ \vdots & & \dots & \\ C_l & \mu(C_l, C_1) & \mu(C_l, C_2) \dots \mu(C_l, C_m) & \end{array} \quad (5.18)$$

Інтерпретатор правил обчислює глобальну індукцію декларативної бази за формулою

$$^+ \hat{C} = \underline{C} \hat{Ind} \underline{\Pi}^D = \{(\underline{C} \hat{Ind} \underline{\Pi}^1) \cup (\underline{C} \hat{Ind} \underline{\Pi}^2) \cup \dots \cup (\underline{C} \hat{Ind} \underline{\Pi}^N)\}, \quad (5.19)$$

де $(CInd\Pi^i)$ — індукція правила $\Pi^i \in$ нечіткою множиною ${}^+C$, отриманою за формулою

$$\begin{aligned} {}^+C &= \{ {}^+C_0 = \{C_0\}, {}^+C_1 = \{\exists_{C_0C_1} [{}^+C_0] \cup \forall_{C_0C_1} [{}^+C_0] \cup \underline{IF}_{C_0C_1} [{}^+C_0]\}, \\ {}^+C_2 &= \{\exists_{C_0C_1C_2} [{}^+C_0, {}^+C_1] \cup \forall_{C_0C_1C_2} [{}^+C_0, {}^+C_1] \cup \underline{IF}_{C_0C_1C_2} [{}^+C_0, {}^+C_1]\}, \\ &\dots, \\ {}^+C_k &= \{\exists_{C_0C_1\dots C_k} [{}^+C_0, {}^+C_1, \dots, {}^+C_{k-1}] \cup \forall_{C_0C_1\dots C_k} [{}^+C_0, {}^+C_1, \dots, {}^+C_{k-1}] \cup \\ &\quad \underline{IF}_{C_0C_1\dots C_k} [{}^+C_0, {}^+C_1, \dots, {}^+C_{k-1}]\}. \end{aligned}$$

У роботі [166] показано, що глобальна індукція не залежить від послідовності обчислень індукції окремих правил для незалежних правил.

Продукційна база знань БПЗ містить множину правил:

$$\Pi^{\Pi} = \{ \Pi_{p\epsilon}^{\Pi}, \Pi_{m\epsilon}^{\Pi}, \Pi_R^{\Pi} \}, \quad (5.20)$$

де $\Pi_{p\epsilon}^{\Pi}$ — множина правил формування локальних керувань у реальному часі шляхом їхнього застосування до моделі ситуації C_p ;

$\Pi_{m\epsilon}^{\Pi}$ — множина правил моделювання зміни ситуації в модельному часі шляхом їхнього застосування до моделі ситуації C_m ;

Π_R^{Π} — множина правил оцінки модельних ситуацій за критеріями якості R і вибору глобального керування в реальному часі.

Структура продукційних правил $\Pi_j^{\Pi} \in \Pi^{\Pi}$:

$$\Pi_j^{\Pi} = \{ (Y_j, \underline{P}_v^j, (\underline{U}_v^j, \underline{P}_u^j)) \}, \quad (5.21)$$

де Y_j — нечітка множина-еталон фрагмента ситуації, до якої застосоване правило;

\underline{U}_j — нечітка множина — керування (фрагмент ситуації ${}^u C$);

$\underline{P}_v^j, \underline{P}_u^j$ — нечіткі відношення, задані на перетинанні множин

$Y \times \{ {}^0 C \cup C_{me} \}$ і $U \times {}^u C$ для правил $\Pi_j^{\Pi} \in \Pi_{PB}^{\Pi}$; $Y \times C_{me}$ і $U \times C_{me}$ для пра-

вил $\Pi_j^{\Pi} \in \Pi_{PB}^{\Pi}$.

Інтерпретатор правил обчислює глобальну продукцію (фрагмент ситуації БД) шляхом застосування правил до моделі ситуації.

Локальне керування розглядається як керування j незалежними процесами, де j — кількість РО на маршрутах. Інтерпретатор правил ініціюється в момент часу, коли з'являється запит у поточній ситуації. Запитом є будь-яка зміна фрагмента ситуації \underline{C}_i ($i = \overline{1, k}$), тобто місця розташування i -ої РО. ССК, що формує локальні диспетчерські керування, не використовує модель в (5.8). Формально запит описується у вигляді $\underline{C}_i^1(t) \neq \underline{C}_i^1(t + \Delta)$. У момент реального часу t інтерпретатор правил обчислює глобальну продукцію:

$${}^{\prime}\underline{C}(t) = \underline{C}_p(t) \text{Pr od } \underline{\Pi}^{\prime L} = (\dots((\underline{C}_p(t) \text{Pr od } \underline{\Pi}_1^{\prime}) \text{Pr od } \underline{\Pi}_2^{\prime}) \dots \text{Pr od } \underline{\Pi}_N^{\prime}), \quad (5.22)$$

де $\underline{\Pi}_p^{\prime} \in \Pi_R^{\prime}$; $\underline{\Pi}^{\prime} \in \Pi_{PB}^{\prime}$ — множина правил керування, що задовольняють критерій R .

Формула знаходження продукції правила $\underline{\Pi}_L^{\prime}$, тобто $\underline{C}_p(t) \text{Pr od } \underline{\Pi}_L^{\prime}$, може бути отримана аналогічно [167]. Як видно з (5.22), локальне керування ${}^{\prime}\underline{C}(t)$ знаходиться з передумови, що на цьому інтервалі часу перевага віддана конкретному критерію R , оскільки продукція обчислюється на групі правил, що задовольняють цей критерій.

Процедура прийняття локального диспетчерського керування переривається в реальному часі (сформоване ССК керування передається на об'єкт, його реалізація через деякий інтервал реального часу приведе до зміни ситуації, що відіб'ється в моделі поточної ситуації й це приведе до нового кроку прийняття рішень) на основі обчислення глобальної продукції (5.22)).

У наступних параграфах наводяться дослідження бази знань із метою визначення умов, за яких однокрокова продукція дає шукане керування.

Глобальне керування. Запитом на розв'язання завдання обчислення глобальних диспетчерських керувань є умова (5.5), тобто прибуття РО на кінцевий диспетчерський пункт маршруту. Із цього моменту реального часу t періодично з інтервалом Δ визначається вектор керування \underline{U}_{ij} , тобто випускати або не випускати i -ту РО у відповідний момент $t+r\Delta$. У кожен момент реального часу $t+r\Delta$ за правилами бази знань Π_{me}^{Π} моделюється процес руху обраної РО. Процедура формування глобального керування така:

1. У момент часу t за декларативними правилами БДЗ Π_{me}^{Π} на підставі ситуації $C_p(t)$ (5.10) формується модель ситуації (5.11).

2. Лічильник модельного часу встановлюється на $T=t$.

3. Глобальна продукція БПЗ, а саме Π_{me}^{Π} ,

$$C'_M(T + \delta) = \underline{C}_M(T) Pr \hat{od} \underline{\Pi}_{me}^{\Pi} \quad (5.23)$$

формує модель ситуації на момент часу $T+\delta$, що відображає прогнозований стан всіх РО.

4. Глобальна продукція БПЗ Π_R^{Π} стосовно до отриманої модельної ситуації $\underline{C}_M(T + \delta)$ дає

$$C'_M(T + \delta) = \underline{C}_M(T) Pr \hat{od} \underline{\Pi}_{R6}^{\Pi}, \quad (5.24)$$

фрагмент ситуації $\underline{C}'_M \subset \underline{C}_M$, що відображає лінгвістичну оцінку ситуації (добра, задовільна й т.д.) за критеріями R .

5. Якщо оцінка ситуації незадовільна, то процес моделювання припиняється й приймається рішення не випускати на маршрут РО в момент реального часу t .

Якщо оцінка ситуації задовільна, то процес моделювання триває, тобто перебуває глобальна продукція (5.22) стосовно до ситуації $\underline{C}_M(T + \delta)$.

Процес моделювання припиняється, коли досягнута мета, тобто ціль в (5.8) є наявною у ситуації $\underline{C}_M(T + k\delta)$. Метою процесу моделювання є до-

сягнення РО кінцевого пункту. При досягненні цієї мети приймається диспетчерське керування про випуск РО на маршрут у момент реального часу t з параметрами: номер маршруту й швидкість руху.

Моделювання ситуації, тобто глобальна продукція (5.23), являє опис ситуації ${}^{n+1}C^i$ в (5.11) (цей рівень моделює надходження інформації від об'єкта й еквівалентний моделі 0C в (5.10)). Потім за правилами P_{me}^D , застосованими до $\{ {}^{n+1}C^i \}_{i=1}^5$, формується ситуація $\underline{C}_M(T + \delta)$. Таким чином, при ситуаційному моделюванні правила P_{me}^D моделюють зміну стану об'єкта, тобто ситуація $\underline{C}_M(T + \delta)$ повинна виникнути через час δ , якщо в момент часу T об'єкт характеризувався ситуацією $\underline{C}_M(T)$. Правила P_{me}^D аналогічні правилам P_{pe}^D , але відрізняються тим, що формують більш узагальнену модель ситуації \underline{C}_M з метою «швидкого» прогнозування змін ситуацій.

5.3. Формування декларативних знань для автоматичної генерації у реальному часі моделі виробничої ситуації

У цьому підрозділі наводиться модель подання фрагментів ситуацій (5.1) і правил (5.13) автоматичного формування моделі поточної ситуації відповідно до (5.19).

Побудова моделі ситуації й декларативних правил подається на прикладі маневрового маршруту 1. Вихідною інформацією, що надходить від бортового комп'ютера РО, на основі якої будується модель фрагмента ситуації, є:

- номер контрольної точки;
- час проходження контрольної точки;
- номер РО;
- номер маршруту.

Точність, з якою модель відображає в реальному часі місце розташування РО, залежить від кількості й розташування контрольних точок на

маршруті. Чим менше відстань між контрольними точками, тим вище точність моделі. Однак, враховуючи велику кількість РО на маршрутах, обробка в реальному часі всіх контрольних точок, наприклад, при установленні контрольних точок на кожній зупинці, є проблематичною для сучасного рівня розвитку обчислювальної техніки. З іншого боку, збільшення кількості контрольних точок прямо не пов'язане з підвищенням ефективності диспетчерського керування. При формуванні диспетчерського керування щодо конкретної РО приймається до уваги груба «розмита» ситуація, що характеризує місце розташування інших РО стосовно керованої. Нечітке місце розташування РО можна сформувати побічно методами нечітких множин. Адекватність цих моделей різна для різних ділянок маршрутів. На тих ділянках, де слабкі фактори, що порушують режими руху РО, можна сформувати адекватну нечітку модель місця розташування на підставі малої кількості контрольних точок. Ділянки маршруту, на які впливають багато збурюючих факторів, вимагають більш частого контролю місця розташування РО, щоб модель за рівнем адекватності задовольняла вимоги диспетчерського керування. Таким чином, ми дійдемо висновку про нерівномірність розміщення контрольних точок на маршрутах. Із цією метою виділені такі збурюючі фактори:

- ворожість пересування РО різних маршрутів на виділеній ділянці (загальна ділянка для декількох маршрутів);
- перетинання декількох маршрутів на виділеній ділянці;
- напружені умови руху по маршруту (перехрестя зі світлофорами, паралельні пересування РО й інших видів транспорту, що конкурують за проїзну частину, наявність й інтенсивність пішохідних переходів та ін.).

З урахуванням думки експертів, фахівців з руху, всі маршрути розбиті на ділянки так, щоб на кожний з них впливало менше збурюючих факторів.

Аналіз моделі мережі рис.4.2 дозволив виділити 54 особливі ділянки. Їхнє розташування за маршрутами наведено на прикладі маршрутів №№ 1,2,3 на рис. 5.1.

У табл. 5.1 наведена прив'язка особливих ділянок до зупинок маршруту 1.

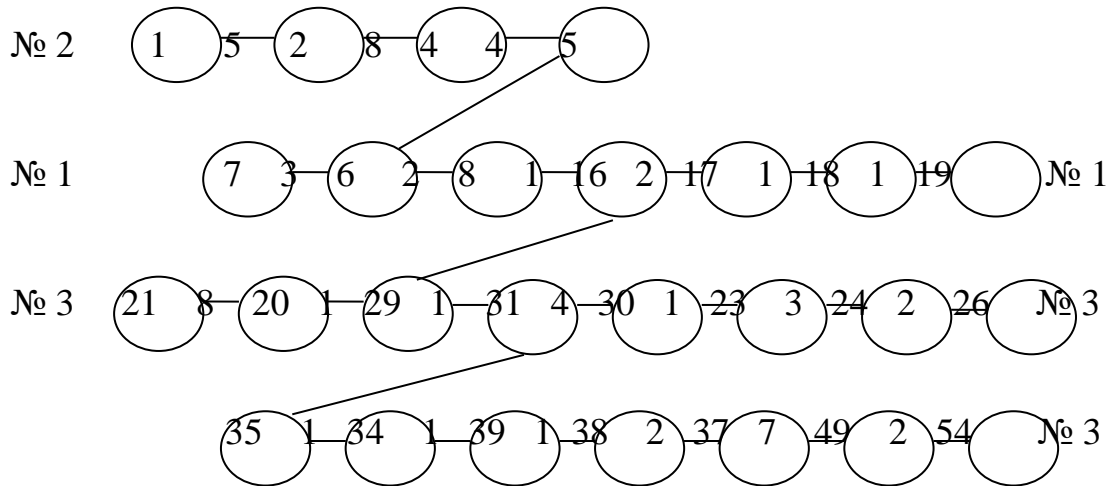


Рис. 5.1. Структура маршрутів РО 1,2,3

Пропонується встановлювати контрольні точки на зупинках, що перебувають на початку виділеної ділянки. На рис.5.3 на прикладі маршруту № 1 показане розміщення контрольних точок. На рисунку заштрихованими трикутниками позначені контрольні точки, поруч із якими стоять їхні імена $K_1 — K_{14}$.

З урахуванням (4.2) і схем рис. 4.3 на рис.5.2 надані структури маршрутів 1 – 3 у вигляді мереж Петрі.

Таблиця 5.1

Розбивка на ділянки маршруту 1

Зупинки	Номери ділянок						
	7	6	8	16	17	18	19
Зуп.11							
Зуп.10							
Зуп.9							
Зуп.8							
Зуп.7							
Зуп.6							
Зуп.5							
Зуп.5							
Зуп.3							
Зуп.2							
Зуп.1							

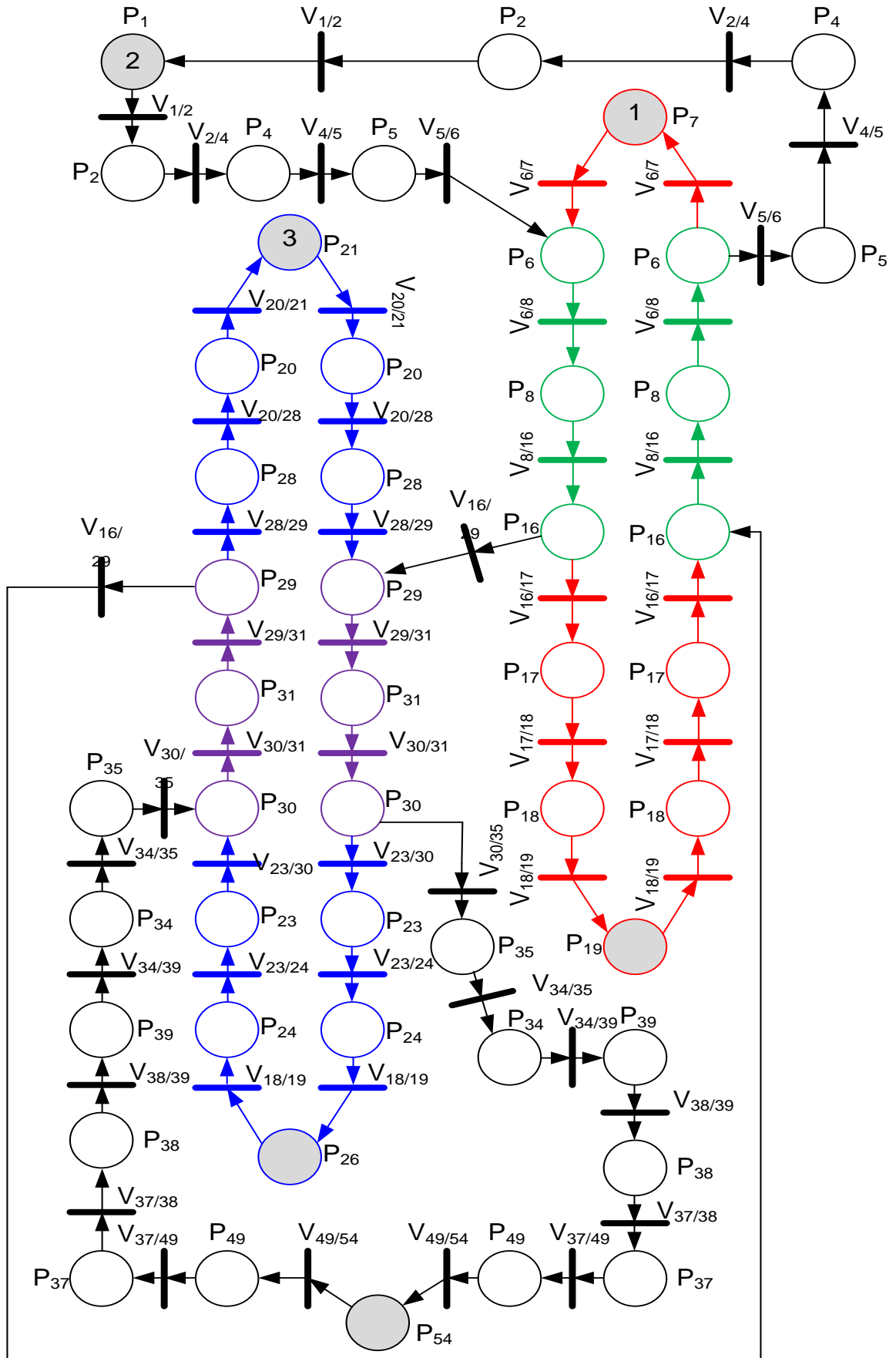


Рис. 5.2. Структура мережі Петрі для маршрутів 1,2,3

Забарвлення ділянок маршруту 1 подано червоним, маршруту 2 – чорним, маршруту 3 – синім, загальних ділянок маршрутів 1 і 2 – зеленим, загальних ділянок маршрутів 2, 3 – фіолетовим кольором.

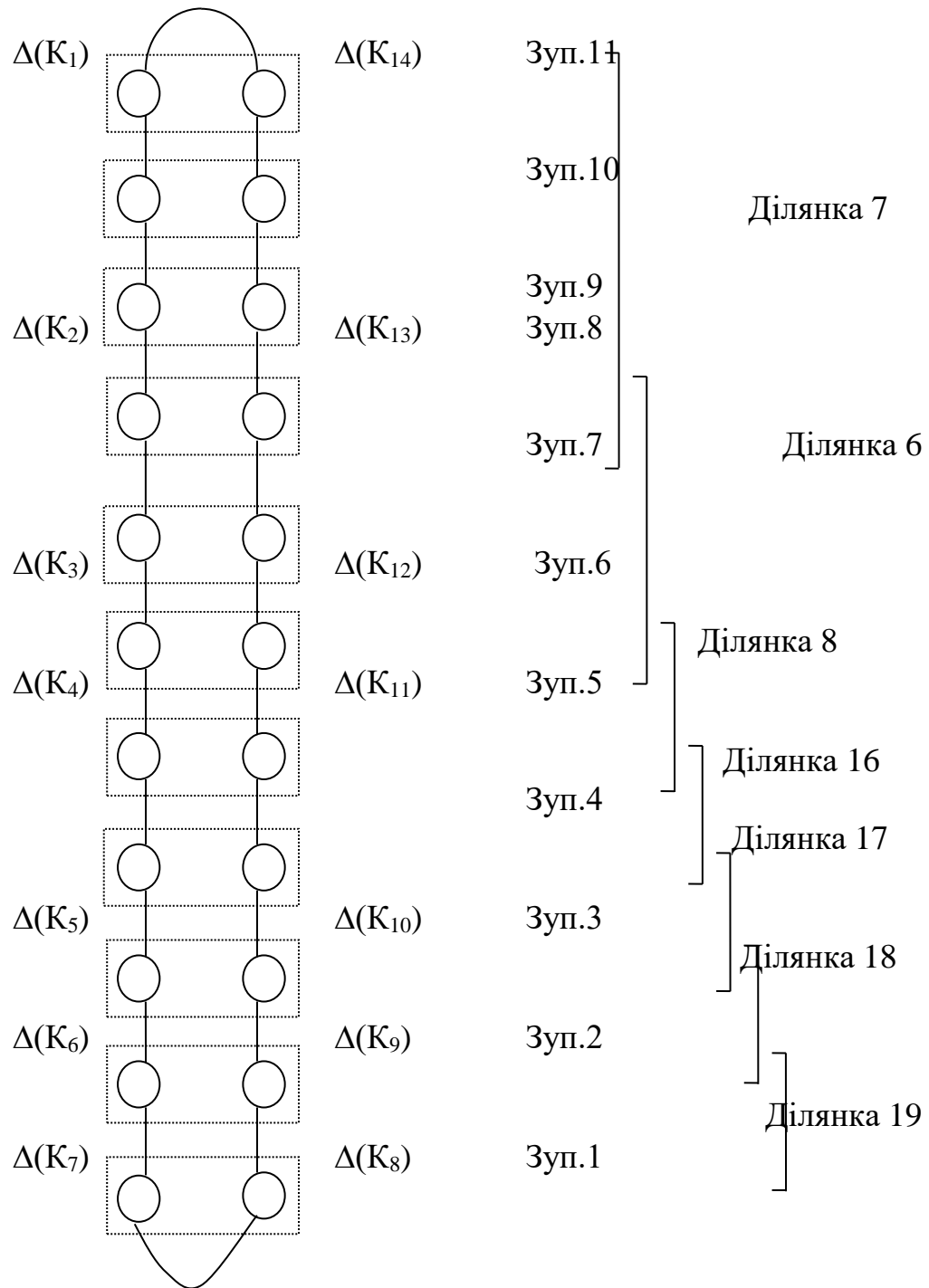


Рис. 5.3. Розташування контрольних точок на маршруті 1

Побудуємо структуру фрагмента ситуації C^l в (5.10). Для кожної РО введемо множину елементів

$${}^{01}C_j^1 = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}, \quad (5.25)$$

де k_i — елемент, поставлений у відповідність i -ій контрольній точці маршруту;

m — кількість контрольних точок на маршруті, наприклад, $m=14$ для маршруту 1 (рис. 5.3).

Функції приналежностей $\mu(k_i)$ формуються контрольновимірювальними приладами. З кожною РО зв'яжемо ще одну множину елементів

$${}^{02}C_j^1 = \{\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_l\}, \quad (5.26)$$

де Δ_i - інтервал розбивки часу, такий, що $T_i - T_{i-1} = l \cdot \Delta$, $l' \leq 1$.

T_i, T_{i-1} - моменти реального часу надходження сигналу від $i-1$ -ої й i -ої контрольних точок.

У момент часу T надходження сигналу з i -ої контрольної точки формуються нечіткі множини (складові фрагмента моделі ситуації)

$${}^{01}\underline{C}_j^1 = \{k_1 / \mu(k_1), k_2 / \mu(k_2), \dots, k_m / \mu(k_m)\};$$

$${}^{02}\underline{C}_j^1 = \{\Delta_1 / \mu(\Delta_1), \Delta_2 / \mu(\Delta_2), \dots, \Delta_l / \mu(\Delta_l)\};$$

так, що

$$\mu(k_i) = 0,97; \mu(k_1) = \mu(k_2) = \dots = \mu(k_{i-1}) = \mu(k_{i+1}) = \dots = \mu(k_m) = 0;$$

$$\mu(\Delta_i) = 1; \mu(\Delta_0) = \mu(\Delta_1) = \dots = \mu(\Delta_l) = 0.$$

Значення функції приналежностей $\mu(k_i) = 0,97$ обрано, виходячи з наступних міркувань. Пікетажне розташування контрольних точок у бортовому контролері встановлюється таким чином, щоб показання лічильни-

ка пройденого шляху між двома сусідніми контрольними точками відповідало відстані до зупинки на маршруті, тобто сигнал від контрольної точки формувався в районі зупинки, до якої приписана контрольна точка. У зв'язку з тим, що вимір пройденого шляху пов'язаний з похибкою, то в момент надходження сигналу від контрольної точки можна бути впевненим на величину меншу одиниці, що РО перебуває на зупинці.

На інтервалі часу Δ_i , де $\Delta_i = T_{i+1} - T_i$ — час, необхідний для пересування РО до наступної по маршруту контрольної точки, нечітка множина ${}^{01}\underline{C}_j^1$ не змінюється, а фрагмент ситуації ${}^{02}\underline{C}_j^1$ відслідковує реальний час.

Для кожної виділеної ділянки j маршрутів уведемо множину елементів ${}_i Y_j^m$, що відповідає зупинкам РО на цій ділянці, де i -номер РО, j -номер ділянки, m -номер маршруту.

Наприклад, для ділянки 7 маршруту 1.

$${}^2\underline{C}_j^1 = \{\langle \text{Зуп.11} \rangle, \langle \text{Зуп.10} \rangle, \langle \text{Зуп.9} \rangle, \langle \text{Зуп.8} \rangle\}.$$

На цій множині елементів автоматично за декларативними правилами в реальному часі будується нечітка множина, що відбиває розмите місце розташування РО в будь-який момент часу $t \in (T_i, T_i + \Delta T_i)$.

Ця нечітка множина формується на основі нечітких множин ${}^{01}\underline{C}_j^1$ і ${}^{02}\underline{C}_j^1$. На рис. 5.4 наведена структура фрагмента ситуації C^1 , побудована за технологією, описаною в п. 5.2.

На рис. 5.4 наведена структура МП для «розмитого» факту-місцезнаходження РО ${}_1 Y_7^1$ (де $i=1$ — номер РО, $j=7$ — номер ділянки, $m=1$ — номер маршруту). Оскільки на одній ділянці, наприклад, сьомій, знаходяться контрольні точки у двох напрямках руху (K_1, K_2 і K_{13}, K_{14}), то на рис. 5.4 сигнали від парних контрольних точок у структурі (K_{11}, K_{13}) об'єднані відношенням «хоча б один». Проміжні елементи (вузли на рис. 5.3)

$\Delta_1^1, \Delta_2^1, \dots, \Delta_1^2, \dots, \Delta_1^7$ служать для відображення того факту, що минулий інтервал часу пов'язаний з відповідною ділянкою маршруту, тому їхні функції приналежностей формуються за відношенням \forall «всі елементи»

Правило, що формує нечіткі множини ${}^4C_j^1, {}^3C_j^1$ в (5.1) з враху-

ванням рис. 5.4 — координати місця розташування j -ої РО наведено нижче

$$\begin{aligned}
 \underline{\Pi}^1 &= \{({}^3C_j^1 = \{Y_7^1 | 1, Y_7^2 | 1, Y_7^3 | 1\}), \underline{\Xi}_{34}^1\}, \\
 ({}^3C_j^1 &= \{\text{зуп1} | 0.85, \text{зуп2} | 0.85, \text{зуп3} | 0.85, \text{зуп4} | 0.85\}, \underline{IF}_{23}^1), \\
 (({}^1C_j^1 &= \{\Delta_1^1 | 1, \Delta_2^1 | 1, \Delta_3^1 | 1\}), \underline{IF}_{12}^1), \underline{IF}_{12}^1), \\
 ({}^1C_j^1 &= \{k_{13} | 1, k_{12} | 1, \dots, k_8 | 1\}, \underline{\Xi}_{01}^1), ({}^1C_j^1 = \{k_1 | 1, k_2 | 1, \dots, k_7 | 1\}, \underline{\Xi}_{01}^2), \\
 ({}^0C_j^1 &= \{0 | 1, \Delta_0 | 1\}, \underline{\forall}_{01}^1), ({}^0C_j^1 = \{\Delta_1^1 | 1, \Delta_2^1 | 1\}, \underline{\forall}_{01}^2), \dots, \\
 ({}^{02}C_j^1 &= \{\Delta_{l-1}^1 | 1, \Delta_l^1 | 1\}, \underline{\forall}_{01}^l), ({}^{01}C_j^1 = \{k_{13} | 1, k_l | 1\}, \underline{\Xi}_{01}^l), \\
 ({}^{02}C_j^1 &= \{k_1 | 1, k_2 | 0\}, \underline{\forall}_{01}^l), ({}^{01}C_j^1 = \{k_{13} | 1, k_{14} | 0\}, \underline{\forall}_{01}^2).
 \end{aligned} \tag{5.27}$$

Розглянемо докладніше формування фрагмента ситуації за правилом (5.27) відповідно до (5.20).

Нехай вихідна ситуація така:

- у момент часу T j -та РО виїхала на маршрут і надійшов сигнал від контрольної точки K_l . У базі даних фрагмент ситуації ${}^{01}\hat{C}_j^1 = \{k_1 / 1, k_2 / 0, \dots, k_{14} / 0\}$ й системні годинники показують $\{\underline{\Delta} = \Delta_0 | 1, \Delta_1 | 0, \Delta_2 | 0, \dots, \Delta_l | 0\}$;
- з (5.16) знаходимо:

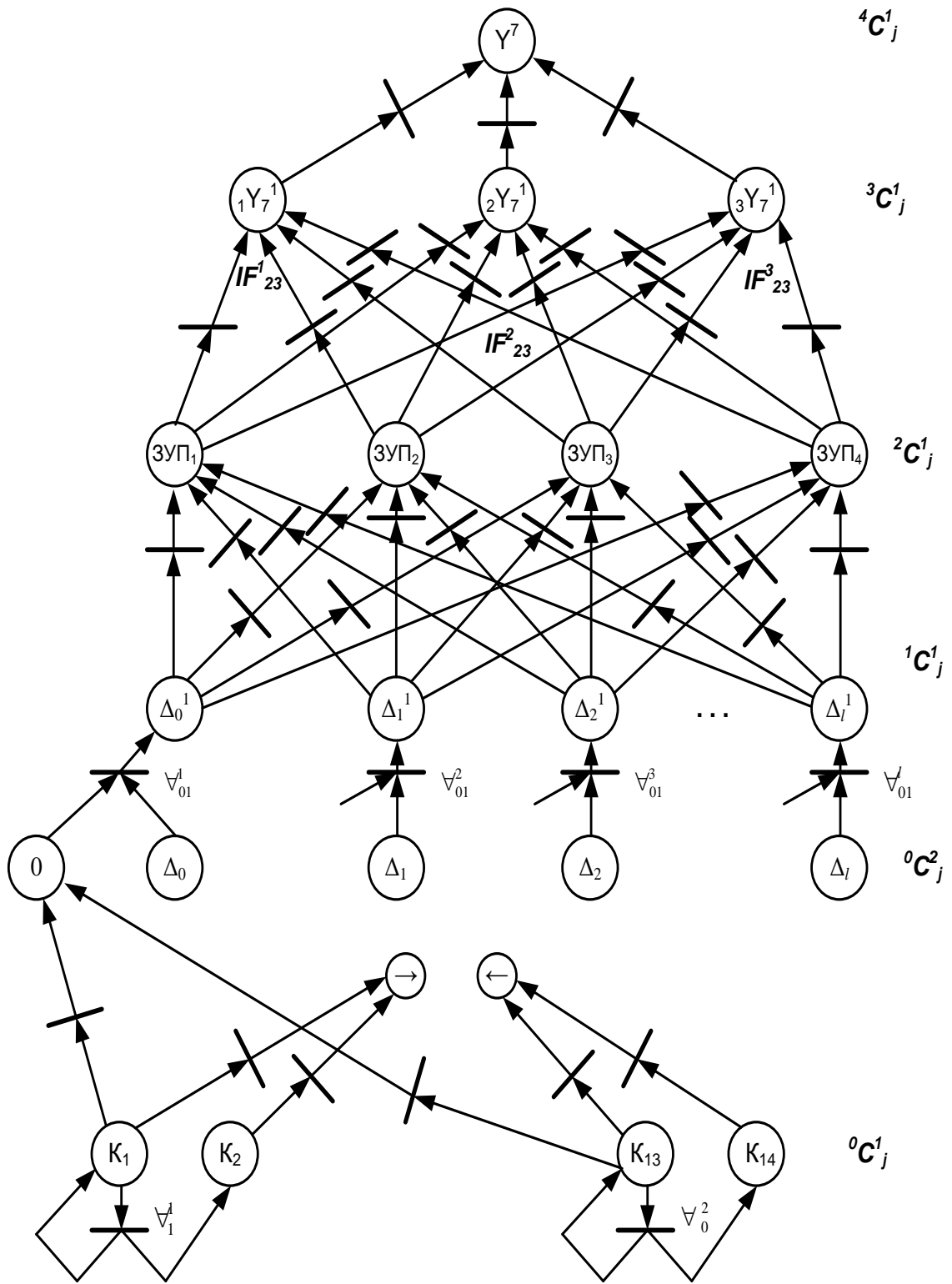


Рис. 5.4 Структура МП «розмитого» факту-місцеположення РО

$${}_1\underline{Y}_7^1, {}_2\underline{Y}_7^1, {}_3\underline{Y}_7^1$$

$$\mu_{\rho_\alpha}(k_1) = \frac{\mu(k_1) - \mu(k_1)}{{}_0\underline{C}} - \frac{\mu(k_1) - \mu(k_1)}{{}_0\underline{\hat{C}}^{l+2}} = 1 - 1 = 0,$$

$$\mu_{\rho_\alpha}(k_2) = \frac{\mu(k_2) - \mu(k_2)}{{}_0\underline{C}} - \frac{\mu(k_2) - \mu(k_2)}{{}_0\underline{\hat{C}}^{l+2}} = 0 - 0 = 0,$$

$$\mu_{\rho_\alpha}(k_1) = \min(\mu_{\rho_\alpha}(k_1), \mu_{\rho_\alpha}(k_2)) = 0;$$

• аналогічно знаходимо: $\mu_{\rho_\alpha}(k_{13}) = 0$;

• знаючи функції приналежностей ${}_0\underline{C}_j^1$ знаходимо напрямок руху РО

(на рис. 5.3 він відображений стрілками $\leftarrow \circ \rightarrow$).

$$3(5.15) \mu_{\rho_\alpha}(\leftarrow) = \max(\mu_{\rho_\alpha}(k_{13}), \mu_{\rho_\alpha}(k_{12}), \dots) = 0 ;$$

$$\mu_{\rho_\alpha}(\rightarrow) = \max(\mu_{\rho_\alpha}(k_1), \mu_{\rho_\alpha}(k_2), \dots) = 1;$$

• таким чином, автоматично за правилом (5.27) можна обчислити напрямок руху (зуп.₁→, зуп.₂→...). Потім обчислюється «розмита» координата місця розташування РО. Тому що час показує $\Delta = \{\Delta_0 | 1, \Delta_1 | 0, \dots, \Delta_9 | 0\}$, то ${}_0\underline{C}_j^1 = \{\Delta_0^1 | 1, \Delta_1^1 | 0, \dots, \Delta_9^1 | 0\}$.

3 (5.17) для заданого відношення \underline{IF}_{12}^1

	зуп.1	зуп.2	зуп.3	зуп.4
Δ_0^1	1.0	0.0	0.0	0.0
Δ_1^1	0.8	0.0	0.0	0.0
Δ_2^1	0.4	0.6	0.0	0.0
Δ_3^1	0.1	0.9	0.2	0.0
Δ_4^1	0.0	0.8	0.6	0.1
Δ_5^1	0.0	0.5	0.9	0.2
Δ_6^1	0.0	0.2	0.8	0.5
Δ_7^1	0.0	0.0	0.3	0.8
Δ_8^1	0.0	0.0	0.15	0.9
Δ_9^1	0.0	0.0	0.05	1.0

(5.28)

знаходимо

$${}^2\underline{C}_j^1 = \underline{\Delta} \circ IF_{12}^1 = \left| \begin{array}{cccc} \mu(\text{зуп}_1)/1.0; & \mu(\text{зуп}_2)/0.0; & \mu(\text{зуп}_3)/0.0; & \mu(\text{зуп}_4)/0.0 \\ \underline{C}_j^1 & \underline{C}_j^1 & \underline{C}_j^1 & \underline{C}_j^1 \end{array} \right| ,$$

де

$$\mu(\text{зуп}_1) = \max\{\min(1.0 \wedge 1.0; 0.0 \wedge 0.8; 0.0 \wedge 0.4; \dots, 0.0 \wedge 0.0)\} = \max\{1.0, 0.0, 0.0, \dots, 0.0\} = 1.0$$

і аналогічно

$$\mu(\text{зуп}_2) = 0.0; \quad \mu(\text{зуп}_3) = 0.0; \quad \mu(\text{зуп}_4) = 0.0.$$

Таким чином, ${}^2\underline{C}_j^1 = \{\text{зуп}_1 | 1.0, \text{зуп}_2 | 0.0, \text{зуп}_3 | 0.0, \text{зуп}_4 | 0.0\}$

Аналогічно, використовуючи нечіткі відносини

$$\underline{IF}_{23}^1 = \begin{array}{c|ccc} & Y_7^1 & Y_7^2 & Y_7^3 \\ \hline \text{зуп}_1 & 0.9 & .01 & 0.0 \\ \text{зуп}_2 & 0.7 & 0.4 & 0.4 \\ \text{зуп}_3 & 0.4 & 0.9 & 0.9 \\ \text{зуп}_4 & 0.0 & 0.4 & 0.9 \end{array} \quad \underline{\Xi}_{34}^1 = \begin{array}{c|c} & Y_7 \\ \hline Y_7^1 & 1.0 \\ Y_7^2 & 1.0 \\ Y_7^3 & 1.0 \end{array} \quad (5.29)$$

знаходимо ділянку маршруту 1, на якій перебуває РО

$${}^3\underline{C}_j^1 = \{Y_7^1 | 0.9, Y_7^2 | 0.0, Y_7^3 | 0.0\};$$

$${}^4\underline{C}_j^1 = \{Y_7 | 1\}.$$

Нехай, через деякий час системні годинники показують час $\underline{\Delta} = \{\Delta_0|0, \Delta_1|0, \Delta_2|1, \Delta_3|0, \dots, \Delta_9|0\}$.

Аналогічні викладення послідовно дають:

$${}^1\underline{C}_j^1 = \{\Delta_0|1, \Delta_1|1, \Delta_2|1, \Delta_3|0, \dots, \Delta_9|0\};$$

$${}^2\underline{C}_j^1 = \underline{\Delta} \cdot IF_{12}^1 = \{0.4; 0.6; 0; 0\};$$

$${}^2\underline{C}_j^1 = \{\text{зуп}_1 | 0.4; \text{зуп}_2 | 0.6; \text{зуп}_3 | 0.0; \text{зуп}_4 | 0.0\};$$

$${}^3\underline{C}_j^1 = {}^2\underline{C}_j^1 \cdot IF_{23}^1 = \{Y_7^1 | 0.6, Y_7^2 | 0.4, Y_7^3 | 0.4\};$$

$${}^4C_j^1 = \{V_7 | 1\}.$$

У правилі (5.27) нечіткі відношення $\underline{IF}_{23}^1, \underline{IF}_{12}^1$, які, в основному, визначають нечітке місце розташування РО, не залежать від часу доби. У той же час, існує залежність швидкості пересування РО від часу доби, обумовлена різною кількістю пасажирів, перешкодами, створюваними іншими транспортними засобами й пішоходами. Ці й інші збурювання врахуємо шляхом введення залежностей

$$\underline{IF}_{23}^1(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_k), \underline{IF}_{12}^1(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_k). \quad (5.30)$$

Для цього скористаємося наступним прийомом. Розіб'ємо час доби на інтервали $Q_1=[0-5\text{година}]$, $Q_2=[5-10]$, $Q_3=[10-15]$, $Q_4=[15-20]$, $Q_5=[20-24]$. Будемо вважати, що матриці (5.28) і (5.29) складені на основі експертних оцінок для інтервалу доби Q_4 , тобто для інтервалу, на якому найбільшою мірою збурювання впливають на РО. Для інших інтервалів цей вплив менший і розподіл функцій приналежностей має інший вигляд. На рис. 5.5 показаний приклад такого розподілу. З рисунку видно, що для інтервалу Q_1 упевненість знаходження РО на зупинці зуп.2 через три інтервали часу менш розмита, ніж для інтервалів Q_2, Q_3 й Q_4 . Найбільшою розмитістю характеризується рух у часи доби Q_4 .

Є два шляхи реалізації процедури, за допомогою якої можна автоматично обчислювати за правилом (5.27) місце розташування РО з урахуванням збурюючих факторів. Перший, найбільш просто реалізований, але досить громіздкий, - це для кожного інтервалу доби $Q_1- Q_5$ зберігати в пам'яті матрицю типу (5.28) і для моментів реального часу $T \in Q_i$ використати в обчисленнях (5.19) і (5.20) відповідні нечіткі відношення. Другий підхід полягає в тому, щоб, використовуючи заздалегідь складені графіки залежностей функцій приналежностей, побудувати математичний апарат переходу від однієї залежності до іншої шляхом перетворення вихідного розподілу Q_4 . Цей шлях пов'язаний з перерахунками в реальному часі. Враховуючи

високу швидкодiю сучасних комп'ютерiв, iх великий об'єм пам'ятi та мiнимальний час реакцiї, обираємо перший пiдхiд.

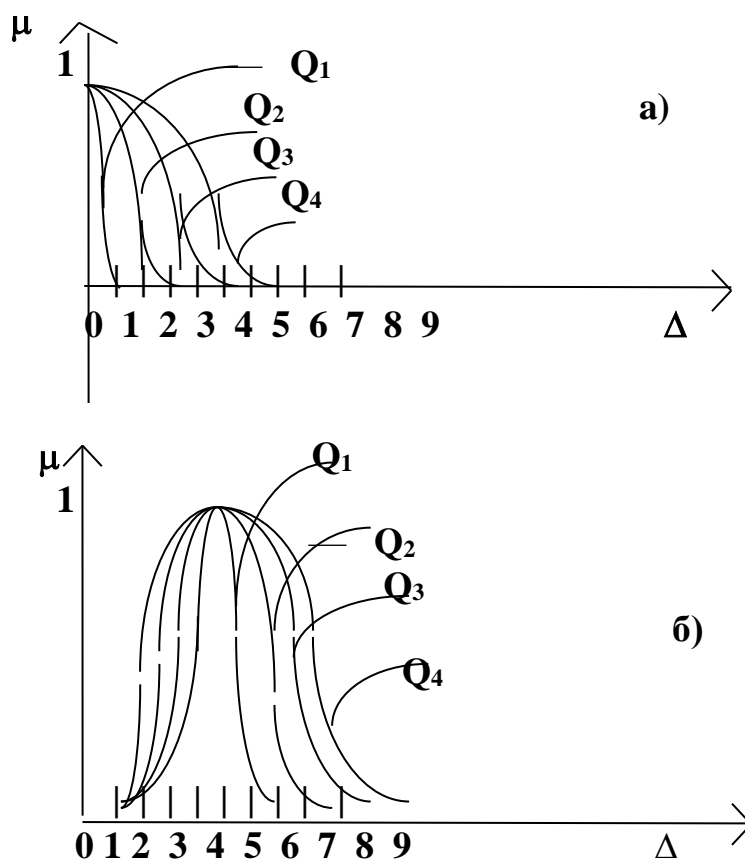


Рис. 5.5. Розподiл функцiй приналежностей для рiзних iнтервалiв доби: а)зуп.1, б)зуп.2

На закінчення розгляду фрагмента S^l ситуації відзначимо, що при прийнятті локальних і глобальних керувань беруться до уваги факти наявності РО на прилеглих ділянках маршруту. Для цього необхідно мати фрагменти ситуації S^l , які б відбивали на кожен момент часу кількість РО на кожній виділеній ділянці. Потрібно побудувати нову структуру МП для розглянутої ділянки на основі всіх РО маршрутів, які проходять через ділянку. На рис. 5.6 наведена така структура. Структури рис. 5.5 й 5.6 дають гнучку процедуру оцінки зайнятості ділянок. Гнучку у тому розумінні, що можна переглядати зайнятість на різних рівнях деталізації, аж до окремих зупинок і перегонів між зупинками.

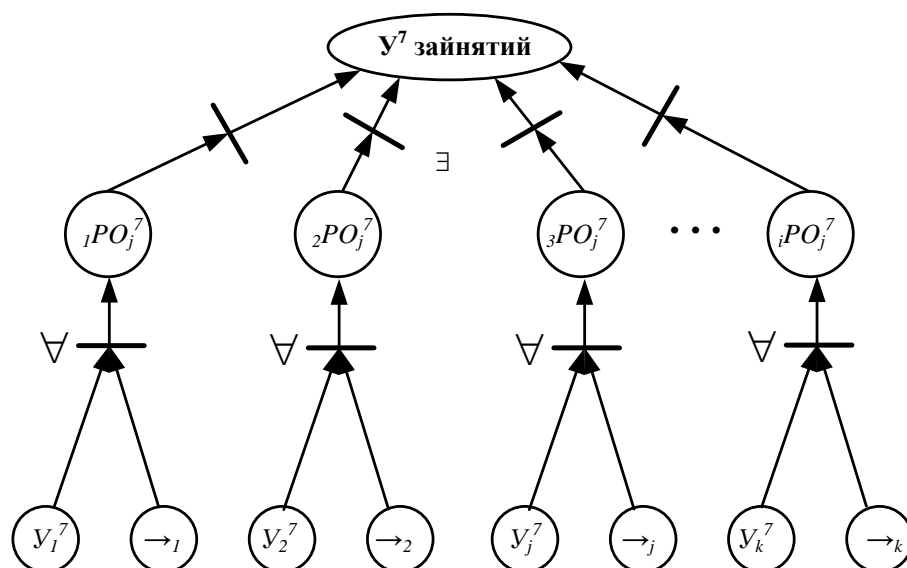


Рис. 5.6. Структура МП, що формує факт наявності i -тої РО на ділянці 7 маршруту j

5.4. Модель ситуації, що описує наповнення рухомої одиниці

Наповнення РО — важлива інформація, використовувана в диспетчерському локальному керуванні. На її основі будуються правила керування, що забезпечують критерій комфортності пасажирів. Із двох підходів до організації системи контролю наповнення РО — точний підрахунок кількості пасажирів, що ввійшли, і грубі методи оцінки кількості пасажирів — для цілей диспетчерського керування більше прийнятний останній.

Для обґрунтування структури системи контролю наповнення РО розглянемо тип РО — електропоїзд приміського сполучення — і на його прикладі побудуємо лінгвістичну змінну НАПОВНЕННЯ. Терми-множини лінгвістичних значень (множина лінгвістичних значень) НАПОВНЕННЯ=(«дуже мале», «мале», «середнє», «повне», «перевантажене», «дуже перевантажене»). Можливі обмеження на нечіткі змінні «дуже мале», «мале» і інші наведено на рис. 5.7. На рисунку позначені функції приналежностей обмеження нечітких змінних: «дуже мале» — 1, «мале» — 2, «середнє» — 3, «повне» — 4, «перевантажене» — 5, «дуже перевантажене» — 6. Функції приналежностей побудовані прямим методом опитування групи експертів, у ролі

яких виступали машиністи. Оцінювання здійснювалося шляхом візуального спостереження салону РО, після посадки/висадки пасажирів на зупинках. При цьому результати спостереження були доповнені природними перешкодами.

З рис. 5.7 видно, що для значень $\alpha=0.5$ при обчисленнях ρ_α в (5.15), (5.16) і (5.17) нечіткі змінні «дуже мале» й «мале», «середнє» й «повне» важко розрізнити, тобто при формуванні лінгвістичної змінної за правилами (5.20) для будь-яких значень кількості пасажирів, наприклад, з діапазону 0 — 20 людей, функції приналежностей $\mu_{\underline{C}}$ («дуже мале») дорівнюють $\mu_{\underline{C}}$ («мале»).

Тому для організації контролю наповнення РО досить ввести чотири елементи, відповідно {мале, повне, переповнене, дуже переповнене}. Нехай бортовий контролер РО має чотири «кнопки», які формують функції приналежностей відповідних елементів фрагмента ситуації ${}^0C_i^1 = \{\text{«мале»}, \text{«повн»}, \text{«переп»}, \text{«дуже переп»}\}$. Структура, що формує фрагмент нечіткої ситуації, наведена на рис. 5.8.

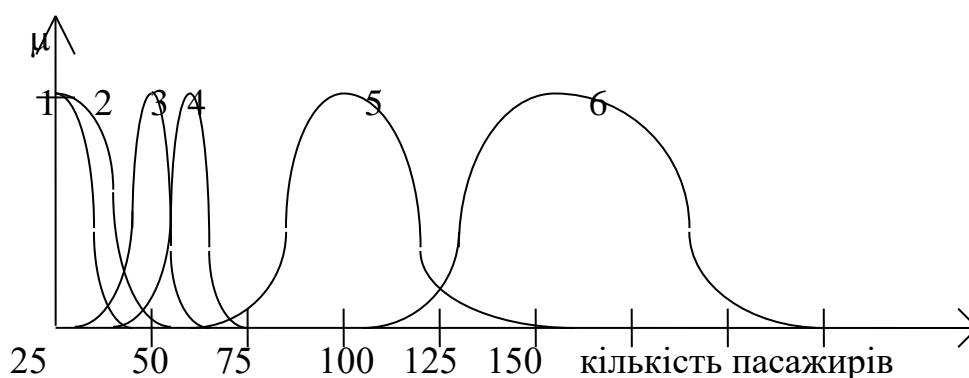


Рис. 5.7. Обмеження на лінгвістичну змінну наповнення

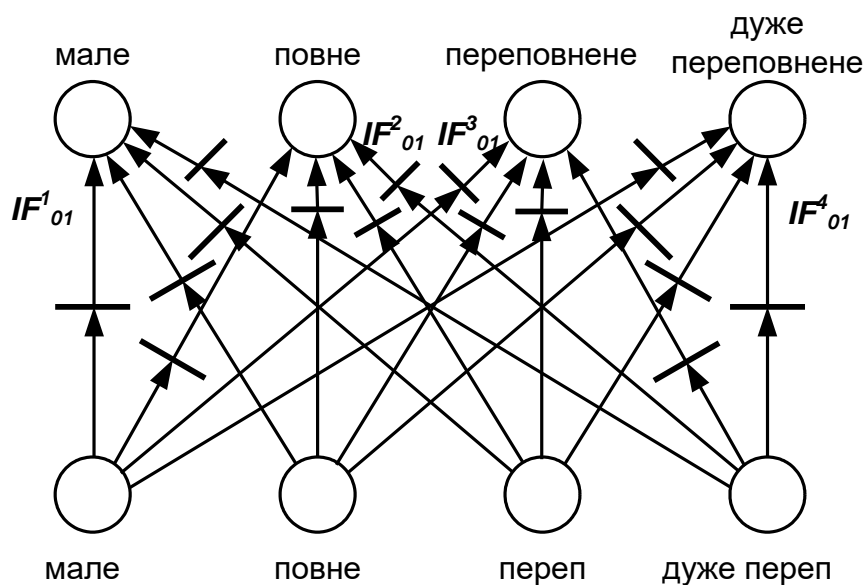


Рис. 5.8. Структура фрагмента ситуації наповнення РО

Правило формування фрагмента ситуації наведено нижче.

$$\underline{P}^2 = \{(\hat{C}_j^1 = \{\text{мал}/1, \text{повн}/1, \text{переп}/1, \text{дуже переп}/1\}), \underline{IF}_{01}^1\} \quad (5.31)$$

Де

	мале	Повне	переповнене	дуже переповнене
$\underline{IF}_{01}^1 =$ Малє	1.0	0.3	0.0	0.0
Повн	0.25	1.0	0.15	0.0
Переп	0.0	0.15	1.0	0.3
дуже переп	0.0	0.0	0.3	1.0

Функції приналежностей відношення \underline{IF}_{01}^1 знайдені на підставі даних рис. 5.7. Нехай водій РО, виходячи зі своїх оцінок, увів інформацію

$${}^0C_j^1 = \{\text{мал}/0, \text{повн}/1, \text{переп}/0, \text{дуже переп}/0\}.$$

За правилом (5.13) буде отримана модель фрагмента ситуації

${}^0C_j^2 = {}^0C_j^1 \cdot |IF_{01}^1| = \{\text{мале}|0.25, \text{повно}|1.0, \text{переповнене}|0.15, \text{дуже переповнене}|0.0\}$.

5.5. Модель ситуації, що описує кількість пасажирів на зупинці

Викладене вище приводять до структури фрагмента ситуації щодо кількості пасажирів на зупинці, що оцінюється в одиницях наповненості РО:

$${}^0C_j^4 = \{0.5_PO, 1.0_PO, 1.5_PO, \text{БІЛЬШЕ_2_PO}\},$$

де j — номер зупинки.

Особливість цього фрагмента полягає в тому, що фрагмент зв'язаний не з РО, а з зупинкою. Структура фрагмента має вигляд, аналогічний (5.31), а декларативне правило формування моделі ситуації наведено нижче

$$\underline{P}^3 = \{({}^0\hat{C}_j^4 \{0.5\ PO|1, 1.0\ PO|1, 1.5\ PO|1, \text{БІЛЬШЕ 2\ PO|1}\}), \underline{IF}_{01}^1\}.$$

		Майже 0.5 РО	Майже 1 РО	Майже 1.5 РО	Більше 2 РО
$\underline{IF}_{01}^1 =$	0.5 РО	1.0	0.55	0.15	0.0
	1.0 РО	0.65	1.0	0.75	0.15
	1.5 РО	0.1	0.6	1.0	0.85
	БІЛЬШЕ 2 РО	0.0	0.15	0.45	1.0

5.6. Модель ситуації, що характеризує технічний стан РО

Бортова система контролю технічного стану РО використовує інформацію від датчиків:

- цифрові датчики — енергоспоживання, освітлення;

- аналогові датчики — гальмові, тиску в пневмо (ПС) та гідросистемах (ГС), зчіпки, буксових вузлів.

Попередня обробка інформації від цих датчиків здійснюється бортовим комп'ютером. Інтегрована характеристика технічного стану РО передається в диспетчерський пункт, на підставі якої формується фрагмент ситуації C_i^3 . За i -тою РО, вихідна інформація для формування ситуації така

$${}^0C_1^3 = \{\text{осв}, \text{енптр}_M, \text{енптр}_H, \text{енптр}_B, \text{торм}_H, \text{торм}_O, \text{торм}_A, \text{тск}_H, \text{тск}_O, \text{тск}_A, \text{сцп}_A, \text{сцп}_H, \text{сцп}_O, \text{бкс}_H, \text{бкс}_A, \text{бкс}_O\}$$

де осв — елемент, функція приналежностей якого ((осв)=1, коли освітлення включене й ((осв)=0 у протилежному випадку;

енптр_M, енптр_H, енптр_B — елементи, що відповідають енергоспоживанню нижче норми, нормі й вище норми;

торм_M, торм_A, торм_O — стан гальмової системи нормальний, аварійний і небезпечний;

тск_M, тск_A, тск_O — стан тиску в системах — нормальний, аварійний і небезпечний;

сцп_M, сцп_A, сцп_O — стан зчіпки — нормальний, аварійний і небезпечний;

бкс_M, бкс_A, бкс_O — стан буксових вузлів — нормальний, аварійний і небезпечний.

Як видно, крім освітлення, всі параметри передаються як трипозиційні. Це зроблено для того, щоб формовані на них нечіткі моделі ситуації були більш інформативними. На рис. 5.9 наведена розбивка області значень параметра на інтервали. З метою демонстрації загального підходу взяті універсальна шкала й функції приналежності (обмеження) лінгвістичного значення «нормально» й «аварійно». Для порога 0.5, при якому значення змінної можна чітко віднести до норми, отримана розбивка області значень на п'ять інтервалів. На рис. 5.9 вони позначені а, о, н, о, а, відповідно, а — аварійний, н — нормальний, о — небезпечний. Зміст ін-

тервалу «небезпечний» полягає в тім, що, якщо, наприклад, значення параметра дорівнює 0.2, то $\mu(0.2)=0.35$ й $\mu_{\alpha}(0.2)=0$, тобто при спробі віднести значення 0.2 до одного із двох найближчих за рівнем $\alpha=0.5$ звичайній множині (норма, авар) одержимо $\mu_{авар_{\alpha}}=0$, $\mu_{норм_{\alpha}}=0$. Тому уведено проміжний інтервал — «небезпечний».

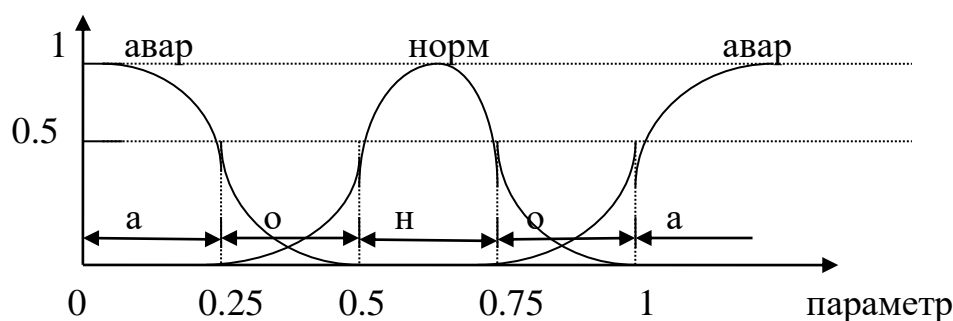


Рис. 5.9. Функції приналежностей нормального, небезпечного й аварійного значення параметрів

Тепер перейдемо до фрагмента ситуації «технічний стан ПЕ». Структура фрагмента наведена на рис. 5.10. Структура дворівнева. Нижній рівень включає елементи ${}^0C_j^3 = \{\text{торм_н, торм_а, торм_про, двл_н, двл_а, двл_про, сцп_н, сцп_а, сцп_про, бкс_н, бкс_а, бкс_про, осв, енпт_н, енпт_м, енпт_б}\}$, функції приналежностей яких формуються при надходженні інформації від бортового комп'ютера j -й РО. Функції приналежностей формуються в такий спосіб:

$$\mu(\text{торм_н}) = \mu(\text{тиск_н}) = \mu(\text{сцп_н}) = \mu(\text{бкс_н}) = \begin{cases} 1, \text{ якщо код "небезп"} \\ 0, \text{ якщо код "авар"} \\ 0, \text{ якщо код "норм"} \end{cases}$$

$$\mu(\text{торм_а}) = \mu(\text{тиск_а}) = \mu(\text{сцп_а}) = \mu(\text{бкс_а}) = \begin{cases} 1, \text{ якщо код "небезп"} \\ 0, \text{ якщо код "авар"} \\ 0.25, \text{ якщо код "норм"} \end{cases}$$

$$\mu(\text{торм_о})=\mu(\text{тиск_о})=\mu(\text{сцп_о})=\mu(\text{бкс_о}) = \begin{cases} 1, \text{ якщо код "небезп"} \\ 0, \text{ якщо код "авар"} \\ 0, \text{ якщо код "норм"} \end{cases}$$

Функції приналежностей елементів другого рівня «норм» $\in {}^1C_j^3$ формуються відношенням \exists , а функції приналежностей елементів «небезп», «авар» $\in {}^2C_j^3$ — за допомогою операції алгебраїчної суми нечітких множин.

$$((\text{небезп})=[((\text{торм_о})+((\text{тск_о})-((\text{торм_о})((\text{тск_о}))+[(\text{сцп_о})+((\text{бкс_о})-((\text{сцп_о})((\text{бкс_о}))-[(\text{торм_о})+((\text{тск_о})-((\text{торм_о})((\text{тск_о}))[[(\text{сцп_о})+((\text{бкс_о})-((\text{сцп_о})((\text{бкс_о})).$$

Необхідність застосування операції алгебраїчної суми викликана тим, що ряд факторів роблять внесок пропорційно своїй функції приналежності в приналежність загального факту «небезпечно».

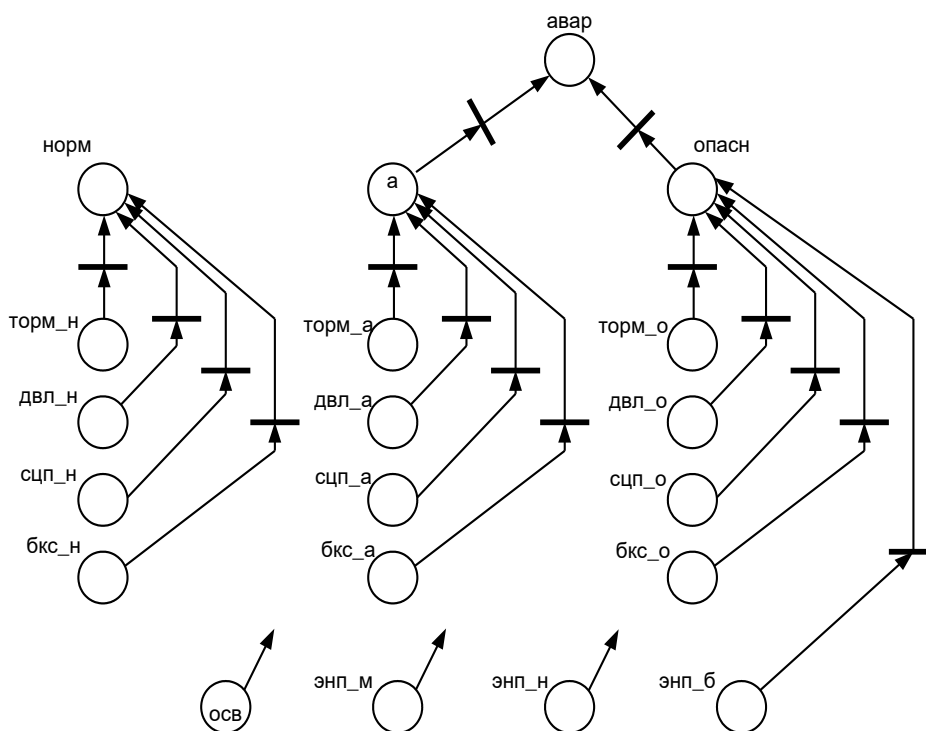


Рис. 5.10. Структура фрагмента ситуації «технічний стан» РО

5.7. Модель ситуації, що характеризує стан колії

Інформація для оцінки стану колії формується в підсистемі ІКС колійного господарства. За кожною ділянкою маршруту в підсистемі диспетчерського керування зберігається узагальнена характеристика колії, подана у вигляді лінгвістичної змінної «СТАН_КОЛІЇ» з терм-множинами

$T(\text{СТАН_КОЛІЇ}) = \{\text{ремонт, аварійн, допуст_кіл_неспр, малий_в_неспр, немає_неспр}\}$.

Код стану колії вводиться із клавіатури в ІКС колійного господарства. За кодом будується нечітка множина, фрагменту ситуації

$$\mu(\text{ремонт}) = \begin{cases} 1, \text{ якщо код " ремонт" } \\ 0, \text{ в інших випадках} \end{cases}$$

$$\mu(\text{аварійн}) = \begin{cases} 1, \text{ якщо код " аварійн" } \\ 0.35, \text{ якщо код " допуст_кіл_неспр" } \\ 0, \text{ в інших випадках} \end{cases}$$

$$\mu(\text{допуст_кіл_неспр}) = \begin{cases} 1, \text{ якщо код " допуст_кіл_неспр" } \\ 0.5, \text{ якщо код " малий_кіл_неспр" } \\ 0, \text{ в інших випадках} \end{cases}$$

$$\mu(\text{малий_кіл_неспр}) = \begin{cases} 1, \text{ якщо код " малий_кіл_неспр" } \\ 0.5, \text{ якщо код " допуст_кіл_неспр" } \\ 0.1, \text{ якщо код " немає_неспр" } \\ 0, \text{ в інших випадках} \end{cases}$$

$$\mu(\text{немає_неспр}) = \begin{cases} 1, \text{ якщо код " немає_неспр" } \\ 0.1, \text{ якщо код " малий_кіл_неспр" } \\ 0, \text{ в інших випадках} \end{cases}$$

5.8. Розроблення продукційних знань формування локальних диспетчерських керувань

Як ми вже відзначали в пп. 5.1 і 5.2, правила локального керування доцільно групувати за критеріями якості керування, а в реальному часі при формуванні керування вибирати, за яким критерієм або групою критеріїв здійснювати керування. Враховуючи зазначене, розглянемо групи правил продукцій, кожне з яких подане у вигляді (5.7).

Група правил, що підтримує максимум пасажироперевезення. При описі правил скористаємося позначеннями фактів, уведеними в п. 5.3 для моделей фрагментів ситуації. Об'єктом локального диспетчерського керування є РО. З метою скорочення часу реакції системи необхідно спеціальним чином організувати секцію правил керування, щоб інтерпретатор не обчислював глобальну продукцію (5.22) шляхом перегляду всіх правил бази продукційних знань. Для цього в кожній групі правил виділимо факти, що описують умови, необхідні для забезпечення критерію. Для пасажироперевезення такими фактами є фактична й очікувана кількість пасажирів на зупинках. Для кожної виділеної ділянки маршруту (рис. 5.3) сформуємо в базі даних факт, що оцінює загальну кількість пасажирів на всіх зупинках ділянки. Для цього розширимо структуру, наведену в п. 5.4, елементами $^1 C_1^4 = \{\text{«мало»}, \text{«багато»}, \text{«дуже багато»}\}$, де 1 — номер ділянки маршруту. І для кожної ділянки побудуємо структуру, приклад якої для ділянки 7 наведений на рис. 5.4.

При формуванні структури використане нове відношення $((n/N))$, що формує функцію приналежностей за формулою

$$\mu(n/N) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \text{Card } \rho_\alpha(\underline{C}, \hat{C}) \geq n \\ 0, & \text{у протилежному випадку.} \end{cases}$$

У такий спосіб на кожен момент реального часу кожна ділянка маршруту характеризується фрагментом $\{\text{«мало»}, \text{«багато»}, \text{«дуже багато»}\}$.

Обробку правил продукції організуємо за маршрутами і правила для кожного критерію, у свою чергу, згрупуємо за маршрутами. На підставі структур рис. 5.10 створимо структури для маршрутів шляхом відображення однотипних відповідних елементів ділянок відношення. Це буде інформація про стан на маршруті. З метою скорочення кількості правил, розглянутих інтерпретатором на кожному кроці прийняття диспетчерського керування, множину правил побудуємо ієрархічно, тобто створимо ієрархію секцій правил. На верхньому рівні ієрархії перебувають правила, що перевіряють маршрути на предмет великої кількості пасажирів на зупинках. Секції правил тих маршрутів, для яких умови не виконуються, надалі не розглядаються. Аналогічно, для маршруту, що задовольняє умови, які перевіряються, будується ієрархічна структура за ділянками маршруту (рис. 5.11).

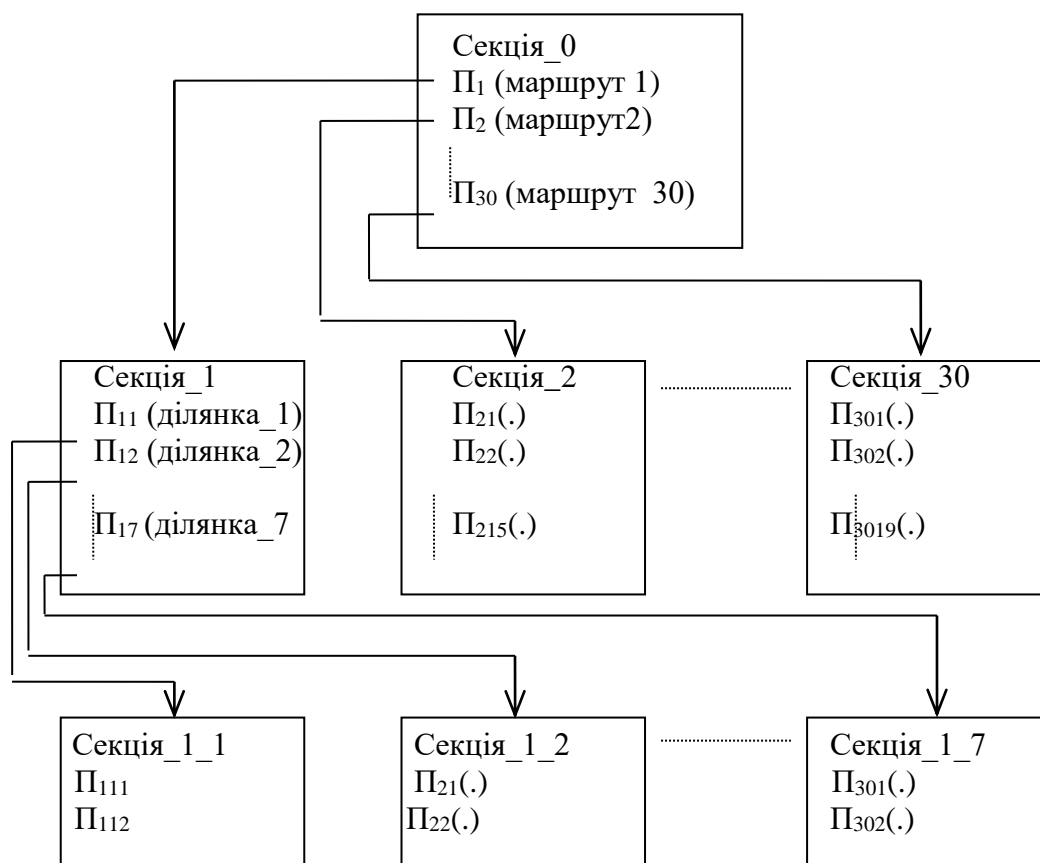


Рис. 5.11. Організація продукційних правил за маршрутами і ділянками маршруту

Приклад правил Секції_0 наведений нижче:

P_1^1 : ЯКЩО ПАСАЖИРИ маршрут_1 багато|0.9

ТОДІ Секція_1

P_1^2 : ЯКЩО ПАСАЖИРИ маршрут_1 дуже_багато|0.85

ТОДІ Секція_1

P_2^1 : ЯКЩО ПАСАЖИРИ маршрут_2 багато|0.9

ТОДІ Секція_2

P_2^2 : ЯКЩО ПАСАЖИРИ маршрут_2 дуже_багато|0.85

ТОДІ Секція_2

P_{30}^2 : ЯКЩО ПАСАЖИРИ маршрут_30 дуже_багато|0.85

ТОДІ Секція_30

(5.32)

У полі умови правил зазначене посилання на фрагмент ситуації ПАСАЖИРИ, його підфрагменти маршрут_і конкретний факт «багато», «дуже багато».

Аналогічний вигляд правила із секцій 1— 30. Нижче наведений приклад для секції_1.

$$\begin{aligned}
 &P_{11}^1: \text{ЯКЩО ПАСАЖИРИ ділянка_1 багато|0.9} \\
 &\quad \text{ТОДІ Секція_1_1} \\
 &P_{11}^2: \text{ЯКЩО ПАСАЖИРИ ділянка_1 дуже_багато|0.85} \\
 &\quad \text{ТОДІ Секція_1_1} \\
 &P_{12}^1: \text{ЯКЩО ПАСАЖИРИ в часток_2 багато|0.9} \\
 &\quad \text{ТОДІ Секція_1_2} \tag{5.33} \\
 &P_{17}^2: \text{ЯКЩО ПАСАЖИРИ ділянка_7 дуже_багато|0.85} \\
 &\quad \text{ТОДІ Секція_1_7}
 \end{aligned}$$

Правила секцій 0,1,2,...,30 відносяться до правил керування логічними висновками, по суті справи, це метаправила. Правила із секцій 1_1, 1_2,..., 1_30 — технологічні правила, за якими реалізується диспетчерське локальне керування. Приклади правил із секції_1_7 наведені нижче.

$$\begin{aligned}
 &P_{171}^1: \text{ЯКЩО ПАСАЖИРИ ділянка_7 багато|0.9} \\
 &I_{PO_1} \text{ місце розташування ділянка_7|1} \\
 &\quad I_{PO_1} \text{ наповнення мал|0.55, повн|0.25} \\
 &\quad I_{PO_1} \text{ технологічне_стан норм|1} \tag{5.34} \\
 &\quad I_{СТАН_КОЛІЇ} \text{ ділянка_7 ремонт|0, аварийн|0,} \\
 &\quad \text{немає_неспр|0.9, малий_в_неспр|0.75} \\
 &\quad I_{НАЯВНІСТЬ_РО_НА_ДІЛЯНЦІ} \text{ ділянка_7 РО_2|0,} \\
 &RO_3|0,RO_4|0,RO_5|0 \\
 &\quad I_{PO_1} \text{ швидкість мала|1} \\
 &\quad \text{ТОДІ РО_1 швидкість середня|1, мала|0}
 \end{aligned}$$

P_{171}^2 : ЯКЩО ПАСАЖИРИ ділянка_7 дуже_багато|1

I РО _1 місце розташування уч_7|1

I РО _1 наповнення мал|0.55, повн|0.25

I РО _1 технологічний_стан норм|1

I СТАН_ШЛЯХУ ділянка_7 ремонт|0, аварійн|0, немає_неспр|0.9,
малий_в_неспр|0.75

I НАЯВНІСТЬ_РО_НА_ДІЛЯНЦІ ділянка_7 РО_2|0, РО_3|0,

РО_4|0, РО_5|0

I РО _1 швидкість мала|1

ТОДІ РО _1 швидкість мала|0, велика|1

P_{171}^3 : ЯКЩО ПАСАЖИРИ ділянка_7 мало|0.8 багато|0.55

I РО _1 місце розташування уч_7|1

I РО _1 наповнення перепр|0.55, дуже_переп|0.95

I РО _1 технологічний_стан авар|1

I РО _1 швидкість середня|1

ТОДІ РО _1 швидкість мала|0, велика|1

I РО _1 повідомлення авар_висадка|1

P_{171}^4 : ЯКЩО ПАСАЖИРИ ділянка_7 мало|0.8

I РО _1 місце розташування уч_7|1

I РО _1 швидкість велика|1

ТОДІ РО _1 швидкість середня|1

P_{171}^5 : ЯКЩО ПАСАЖИРИ ділянка_7 багато|0.55 дуже_багато|0.85

I РО _1 місце розташування уч_7|1

I РО _1 наповнення мал|0.55, повн|0.55

I РО _1 технологічний_стан норм|1

I СТАН_ШЛЯХУ ділянка_7 ремонт|0, аварійн|0,

I РО _1 місце розташування зуп_3|0.55, зуп_4|0.55

I РО _1 швидкість середня|1

ТОДІ РО_1 швидкість велика|1

Вище наведена частина правил для керування РО 1. Повна множина правил секції_1_7 включає правила для всіх РО маршруту, а на ділянках загальних для декількох маршрутів, потрібні правила для всіх РО спільних маршрутів. Якщо, наприклад, для маршруту 1 номінальна кількість РО складе 5, ділянок на маршруті — 7. (рис. 5.3), кількість правил для однієї РО — 17, то загальна кількість правил секції_1 (секція_1_1, секція_1_2, ..., секція_1_7) становить 595 за одним критерієм. З урахуванням того, що маємо наприклад 30 маршрутів, база продукційних знань за одним критерієм становить 17850 правил. При цьому на кожному кроці прийняття рішень обробляється тільки невелика частина з них — правила ділянок з більшою кількістю пасажирів.

Таким чином, розглянутий підхід до організації БЗ пов'язаний з великим обсягом робіт на етапі підготовки БЗ і зі швидкими обчисленнями в реальному часі на етапі експлуатації системи.

Другий варіант БЗ полягає в організації правил для РО, а не для ділянок— маршрутів— ділянок. Логічна організація бази знань має вигляд, наведений на рис. 5.12.

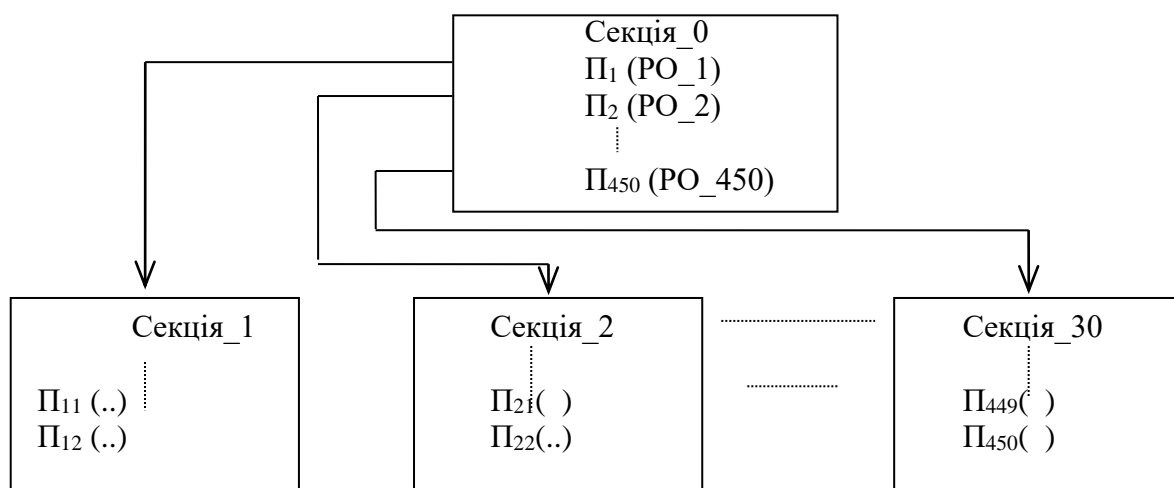


Рис. 5.12. Логічна організація бази знань стосовно РО

Приклади правил (метаправил) секції_0 наведені нижче.

P_1^1 : ЯКЩО РО_1 наповнення переп|0, дуже_переп|0
 І РО_1 технічний_стан норм|1
 І РО_1 місце розташування діл_1|1
 І ПАСАЖИРИ діл_1 багато|0.55, дуже_багато|0.55

ТОДІ Секція_1

P_1^2 : ЯКЩО РО_1 наповнення переп|0, дуже_переп|0
 І РО_1 технічний_стан норм|1
 І РО_1 місце розташування діл_2|1
 І ПАСАЖИРИ уч_2 багато|0.55, дуже_багато|0.55

ТОДІ Секція_1

$P_1^{n_1}$: ЯКЩО РО_1 наповнення переп|0, дуже_переп|0
 І РО_1 технічний_стан норм|1
 І РО_1 місце розташування діл_к1|1
 І ПАСАЖИРИ діл_к1 багато|0.55, дуже_багато|0.55

ТОДІ Секція_1

$P_1^{L_{450}}$: ЯКЩО РО_450 наповнення переп|0, дуже_переп|0
 І РО_1 технічний_стан норм|1
 І РО_1 місце розташування діл_к450|1
 І ПАСАЖИРИ діл_к450 много|0.55, дуже_багато|0.55

ТОДІ Секція_450

Технологічні правила із секцій, наприклад, 1 мають вигляд:

P_{11} : ЯКЩО РО_1 місце розташування діл_1|1
 І СТАН_ШЛЯХУ ділянка_1 ремонт|0, аварійн|0
 І НАЯВНІСТЬ_РО_НА_ДІЛЯНЦІ ділянка_1 РО_2|0,
 РО_3|0,..., РО_n|0
 І РО_1 швидкість мала|1

ТОДІ РО_1 швидкість мала|1, велика|1

P_{12} : ЯКЩО РО_1 місце розташування діл_2|1

І СТАН_ШЛЯХУ ділянка_2 ремонт|0, аварійн|0
 І НАЯВНІСТЬ_ РО _НА_ДІЛЯНЦІ ділянка_2 РО _2|0,
 РО _3|0,..., РО _n|0
 І РО _1 швидкість мала|1
 ТОДІ РО _1 швидкість мала|0, велика|1
 П₁₁: ЯКЩО РО _1 місце розташування діл_к₁|1
 І СТАН_ШЛЯХУ ділянка_к₁ ремонт|0, аварійн|0
 І НАЯВНІСТЬ_ РО _НА_ДІЛЯНЦІ
 ділянка_к₁ РО _2|0, РО _3|0,..., РО _n|0
 І РО _1 швидкість мала|1
 ТОДІ РО _1 швидкість мала|1, велика|1

З наведеного прикладу видно, що кількість правил у секція_0 $N_{\text{секція}_0} = 450 \times 20 = 9000$; у секціях 1—450 $N_{\text{секція}_i} = 20 \times 17 = 340$. Усього правил $N = 9000 + 340 \times 450 = 162000$. Велика кількість правил обумовлена необхідністю їхнього багаторазового повторення через відсутність механізму підстановки, то замість до₁ правил $\Pi_1^1, \dots, \Pi_1^{k_1}$ секція_0 буде містити одне

П₁: ЯКЩО РО _1 наповнення переп|0, дуже_переп|0
 І РО _1 технічний_стан норм|1 (5.35)
 І ПАСАЖИРИ УЧ(РО _1 місце розташування) багато|0.55,
 дуже_багато|0.55
 ТОДІ Секція_1

Для обробки такого правила інтерпретатор повинен виконати підстановку конкретного фрагмента ситуації ПАСАЖИРИ ДІЛЯНКА, на якому перебуває РО в поточний момент часу. Для цього класу інтерпретатора одержуємо розмірність БЗ $N = 450 + 450 \times 17 = 8100$, за умови, що максимальна кількість технологічних правил керування однієї РО не перевищує 17. Кі-

лькість оброблюваних правил на кожному кроці керування становить $N=450+17*K$ (де K — кількість рухомих одиниць, для яких виконуються умови правила (5.35). Якщо допустити, що $K=150$ (одна третина), то $N=3000$.

Введення процедури підстановки дозволяє реорганізувати логічну структуру БЗ і для першого варіанта. Якщо ввести узагальнені правила для секцій $1_1, \dots, 1_7, 2_1, \dots, 30_19$ (загальні правила керування РО), а особливості деяких ділянок описати додатковими конкретними правилами, специфічними для розглянутої ділянки, то загальна кількість правил складе $N=N_{\text{секція}_0} + \sum_{i=1}^{30} N_{\text{секція}_i} + 17 + N_{\text{унік}} = 30+450+17+N_{\text{унік}} = 497+N_{\text{унік}}$. Кількість унікальних правил $N_{\text{унік}}$ становить $N_{\text{унік}} \leq 50$. У такий спосіб $N = 547$.

Таким чином, дійдемо висновку, що найбільш ефективним є перший варіант організації БЗ у вигляді: МАРШРУТ— ДІЛЯНКА— ЗАГАЛЬНІ ПРАВИЛА— УНІКАЛЬНІ ПРАВИЛА (ДІЛЯНКА).

Група правил, що підтримує максимальну комфортність. Ця група правил, по суті справи, “протилежна” раніше розглянутій групі. Правила секції $_0$ і секцій $1—30$ аналогічні (5.32), (5.33), а технологічні правила (5.34) відрізняються. Комфортність пасажирів забезпечується при малому й повному наповненні РО, з одного боку, невеликим часом очікування пасажирів на зупинці, а з іншого боку, відсутністю “пробок” (скупчення й простій РО) на критичних ділянках. При локальному керуванні перша умова досягається шляхом запобігання скупченню пасажирів на зупинках, друга умова — шляхом обчислення дистанції між сусідніми РО (наприклад, правила, наведені в (5.37). І остання умова — запобігання малій дистанції між сусідніми РО (5.38). Для кожної групи правил умови їхнього застосування різні, тому відрізняються й метаправила секцій $0, 1, \dots, 30$. Нижче наводяться приклади правил, що задовольняють критерію комфортності.

Секція $_0$

Π_1^0 : ЯКЩО ПАСАЖИРИ маршрут_1 мало|0.8

ТОДІ Секція_1

Секція_1

P_1^1 : ЯКЩО ПАСАЖИРИ ділянка_1 мало|0.8

ТОДІ Секція_ЗАГ (5.36)

Секція_ЗАГ

P_1^2 : ЯКЩО РО (місце розташування ділянки) наповнення перепов|0,
дуже_перепов|0

І РО (місце розташування ділянка) технічний_стан
норм|1

І СТАН_КОЛІЇ ділянка немає_неспр|0.9

ТОДІ РО(місце розташування ділянка) швидкість велика|1

Секція_0

P_1^0 : ЯКЩО НАЯВНІСТЬ_РО_НА_ДІЛЯНЦІ ділянка_6 зайнят|0

І ІНТЕРВАЛ_РУХУ_ДІЛЯНЦІ ділянка_6 велика|1

І НАЯВНІСТЬ_РО_НА_ДІЛЯНЦІ ділянка_7 зайнят|1

І РО (НАЯВНІСТЬ_РО_НА_ДІЛЯНЦІ ділянка_7)

технічний_стан норм|1

І РО (НАЯВНІСТЬ_РО_НА_ДІЛЯНЦІ ділянка_7) швидкість
мала|0.55, середня|0.55 (5.37)

ТОДІ ПЕ(НАЯВНІСТЬ_ПЕ_НА_ДІЛЯНЦІ ділянка_7)

швидкість мала|0, середня|0, велика|1

Секція_0

P_1^0 : ЯКЩО НАЯВНІСТЬ_РО_НА_ДІЛЯНЦІ ділянка_i зайнят|0

І ІНТЕРВАЛ_РУХУ_ДІЛЯНЦІ ділянка_i велика|1

І НАЯВНІСТЬ_РО_НА_ДІЛЯНЦІ ділянка_i-1 зайнят|1

І РО (НАЯВНІСТЬ_РО_НА_ДІЛЯНЦІ ділянка_i-1) швидкість
середня|0.55, велика|0.55 (5.38)

ТОДІ РО(НАЯВНІСТЬ_РО_НА_ДІЛЯНЦІ ділянка_i-1)

швидкість середня|0, велика|0, мала|1

Як видно, правила із групи (5.37) і (5.38) не структуровані за секціями, так як вони перевіряють умови на ділянках, тому їхня кількість невелика (кількість ділянок — 54, кількість правил на одній ділянці від трьох до семи).

Аналогічно можна навести приклади правил, що задовольняють критерії безпеки перевезень й енерговитрати на перевезення.

На закінчення параграфу відзначимо, що для цілей регулювання (локального керування) динамічно формованого графіка руху по маршрутах можна побудувати одну групу правил. Якщо графік руху сформований з урахуванням перерахованих критеріїв, то його регулювання (прийняття рішень при відхиленнях) можливо за допомогою компромісних критеріїв. Приклад розроблення нечіткої моделі регулювання швидкості рухомої одиниці надано у додатку А.

Висновки

1. Сформовані нечіткі фрагменти ситуацій, які описують кількість пасажирів на зупинці; технічний стан РО; наповнення рухомої одиниці та інші, а також розроблено модель інтегрованої підсистеми ситуаційного моделювання й керування, що дозволяє врахувати вплив сукупності усіх параметрів зовнішнього середовища на формування швидкості рухомої одиниці, яка рекомендується.

2. Розроблено моделі організаційного керування на прикладі мережі маневрових маршрутів РО на станції. Використано принципи ситуаційного керування, відповідно до якого кожна ситуація, у якій доводиться приймати управлінське рішення порівнюється із базою завчасно розглянутих ситуацій. Для такого аналізу запропоновано застосування методів нечіткого висновку. Таким чином, була побудована нечітка модель для завдання швидкості окремої рухомої одиниці.

3. В якості моделюючого було використано інтегроване середовище MatLab 6.5 та пакет Fuzzy Logic ToolBox. На прикладі конкретної ситуації продемонстровано функціонування побудованої моделі.

РОЗДІЛ 6

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДУ АДАПТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ СИГНАЛІВ ДЛЯ КОНТУРІВ КЕРУВАННЯ РУХОМИМИ ОДИНИЦЯМ

У більшості випадків при функціонуванні КК регульовані величини спостерігаються на фоні завад з характеристиками, що змінюються в широких границях.

Коли в корисному сигналі присутні завади (шуми), то при великих значеннях коефіцієнтів настроювання регуляторів у КК параметрами руху засобами рейкового транспорту виникають зміни регульованих величин, які приводять до значного погіршення якості перехідних процесів, а в ряді випадків і до катастрофічних наслідків для об'єктів керування. Такими наслідками є, наприклад, неприпустимі межі зміни тиску, тяги, гальмування, швидкості РО й ін.

На КК для РО впливають різноманітні завади, які формуються електроприводами РО, рейковими колами, підсистемами живлення та іншими агрегатами.

На теперішній час відсутня узагальнена інформація про характеристики завад, які впливають на функціонування КК об'єктами рейкового транспорту. Тому для побудови ефективних КК необхідно отримати характеристики завад,

6.1 Дослідження джерел завад, діючих у контурах керування рухомими одиницями рейкового транспорту

У цьому підрозділі виконано аналіз завад, які виникають при функціонуванні найбільш розповсюджених технологічних агрегатів та пристроїв, що використовуються при функціонуванні РО рейкового транспорту. До них відносяться: тягові агрегати локомотивів з відповідними перетворювачами, різні джерела живлення, рейкові кола

(основний та найбільш розповсюджений пристрій залізничної автоматики).

Аналіз методів побудови контурів керування РО дозволяє оцінити основні характеристики об'єктів керування. У ряді випадків параметри таких об'єктів є незмінними або змінюються в досить малих границях, при яких об'єкт можна вважати стаціонарним. У значному числі випадків об'єкти керування характеризуються нестационарністю характеристик.

Завади, що діють у КК керування електроприводами РО з напівпровідниковими перетворювачами сигналів керування, можна розбити на два види [168, 169].

Завади першого виду властиві електротехнічним системам з напівпровідниковими перетворювачами (тиристорами), тому що нерозривно пов'язані із принципами їхньої роботи: широтно-імпульсним перетворенням напруг і струмів, раптовими короткими замиканнями джерела енергії комутації та інше. Ці завади мають місце при нормальній роботі КК

Завади другого виду пов'язані з порушеннями алгоритму керування напівпровідниковими перетворювачами. У результаті спостерігаються пропуски, зайві включення напівпровідникових перетворювачів або інші ситуації.

Завади в КК з тиристорними перетворювачами, як і в будь-яких інших КК, формуються неперервно і можуть бути розбиті на три групи:

- випадкові зміни параметрів електроенергії на вході вентильного перетворювача;
- випадкові коливання навантаження системи;
- флуктуації параметрів у керуючому тракті КК.

Першу групу завод у КК становлять флуктуації напруги в трифазній промисловій мережі. Швидкість генераторів і турбогенераторів, що виробляють електроенергію, у силу всіляких причин не залишається постійною, а змінюється випадково у певних межах. Крім того, на

мережу, до якої підключен КК електропривода, випадково впливають різні навантаження - лінійні й нелінійні, симетричні й несиметричні. У результаті форма напруги в електричній мережі стає не синусоїдальною, а випадковою функцією часу.

Друга група завад у КК з тиристорними електроприводами - це випадкові зміни навантаження (моменту опору). Такий характер завад мають електроприводи РО, коли міняється навантаження залежно від профілю колії

Завади у системі електроживлення або в навантаженні на валу електродвигуна виводять об'єкт керування із заданого режиму.

Третю групу завад у КК тиристорного перетворювача становлять флуктуації параметрів у слабкострумівих керуючих ланцюгах. Керування системою здійснюється за допомогою вентиляного перетворювача, що є підсилювачем потужності з досить високим коефіцієнтом підсилення. Тому незначні флуктуації в КК можуть приводити до відчутного випадкового процесу на виході перетворювача.

Істотним джерелом випадкових завад може бути сама система імпульсно-фазового керування (СІФК).

Розглянемо як приклад транзисторну багатоканальну СІФК з вертикальним принципом керування. При «ідеальних» зовнішніх умовах виявлені деякі внутрішні причини відмінності кутів керування α у різних каналах при синусоїдальній й пілкоподібій напругах.

Основною причиною цього є розкид параметрів транзисторів, використовуваних у якості нуля органа. Так само впливає асиметрія керуючих імпульсів в умовах, коли кожний канал керування дає випадкове відхилення кута керування від ідеального. Якщо врахувати зміну температури й деякі інші фактори, то відхилення кута керування можна вважати випадковою функцією.

У цифрових СІФК [168, 169] причини флуктуації кута керування різноманітні. Вони пов'язані з різною точністю фіксації нуля органами

моментів переходу лінійних напруг живильного перетворювача мережі через нульові значення. Відносно невисока розрядність мікро-ЕОМ і кінцевий об'єм пам'яті також приводить до випадкових похибок в обчисленні кута керування і його реалізацій.

Крім СІФК, джерелами збурювання є генератор керуючого сигналу й датчик швидкості електродвигуна. Описані вище деякі збурювання третьої групи, флуктуації в слабкострумних ланцюгах обумовлені внутрішніми причинами. Однак є й зовнішні причини, наприклад:

- флуктуації в живильній мережі приводять до флуктуацій у розгортаючій напрузі, що розгортає, СІФК;
- відхилення кутів керування напівпровідниковими перемикачами (наприклад, кутів включення тиристорів керованих випрямлячів тягових двигунів [168]) також є випадковими функціями часу;
- флуктуації моменту навантаження тягових двигунів приводять до флуктуацій швидкості й через датчик швидкості передаються в КК;
- при наявності підлеглого регулятора струму двигуна, завади передаються в КК через датчик струму двигуна й ін.

У ряді робіт [185-187] показана застосовність параметричного методу формування процесу кінцевої тривалості для аналізу КК, в яких придушуються субгармонічні складові неканонічних завад.

Застосування замкнених систем заглушення низькочастотних субгармонічних складових є ефективним засобом поліпшення гармонійної складової вихідної напруги напівпровідникового перетворювача електричної енергії, що працює в умовах впливу несиметрії керування й живильних ЕРС. Наявність у контурах заглушення селективних ланок, що мають підвищений коефіцієнт підсилення на частотах субгармонік, приводить до перекручувань частотної характеристики перетворювача. На рис. 6.1 зображена узагальнена структурна схема такої системи заглушення.

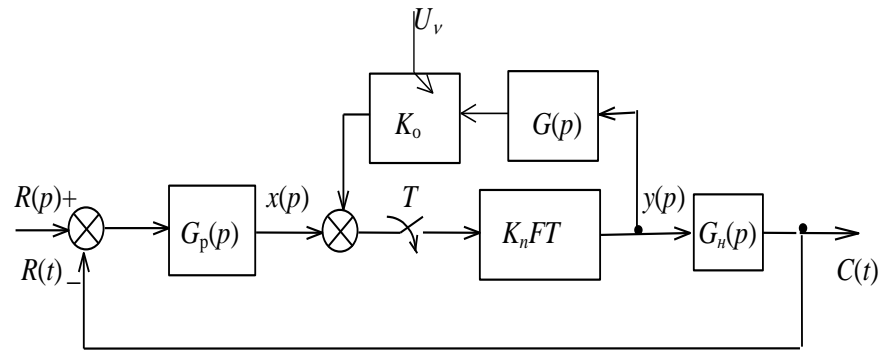


Рис. 6.1. Узагальнена структурна схема системи заглушення

На структурній схемі перетворювач представлений у вигляді імпульсної моделі, що містить ідеальний імпульсний елемент із періодом квантування T , статичний коефіцієнт передачі K_n і фактор пульсацій F , що враховує перекошування частотних характеристик. Контур заглушення ν -ої низькочастотної субгармоніки містить селективну ланку з передатною функцією

$$G(s) = \frac{T_\nu s}{T_\nu^2 s^2 + 2\xi T_\nu s + 1}, \quad (6.1)$$

і параметрично регулюючу у функції зміни амплітуди U_ν субгармоніки ланку K_o . Селективна ланка має два комплексно-комплексно-сполучених полюси

$$s_{1;2} = \frac{-\xi \pm j\sqrt{1-\xi^2}}{T_\nu}. \quad (6.2)$$

Зв'язок між вхідним і вихідним сигналами системи заглушення визначається передатною функцією, записаною у формі модифікованого Z -перетворення

$$W^*(z) = \frac{K_n F}{1 + z^{-1} K_n F T G_o^*(z)}, \quad (6.3)$$

де $G_o^*(z) = K_o G^*(z)$, а F – фактор пульсацій.

Амплітудно-частотна характеристика системи заглушення завад

$$A(\omega) = 2K_n F \sqrt{\frac{(ch\xi \frac{T}{T_v} \cos \omega T - \cos a \frac{T}{T_v})^2 + sh^2 \xi \frac{T}{T_v} \sin^2 \omega T}{[2(ch\xi \frac{T}{T_v} \cos \omega T - \cos a \frac{T}{T_v})^2 + K_o K_n F \frac{T}{T_v} (\cos a \frac{T}{T_v} - \frac{\xi}{a} \sin a \frac{T}{T_v} - e^{-\frac{\xi T}{T_v} \cos \omega T}]^2 + (2sh\xi \frac{T}{T_v} \sin \omega T + K_o K_n F \frac{T}{T_v} e^{-\frac{\xi T}{T_v} \sin \omega T})^2}} \rightarrow \quad (6.4)$$

$$\leftarrow \frac{1}{-e^{-\frac{\xi T}{T_v} \cos \omega T}]^2 + (2sh\xi \frac{T}{T_v} \sin \omega T + K_o K_n F \frac{T}{T_v} e^{-\frac{\xi T}{T_v} \sin \omega T})^2},$$

Фазово-частотна характеристика системи заглушення завод

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{sh\xi \frac{T}{T_v} \sin \omega T}{ch\xi \frac{T}{T_v} \cos \omega T - \cos a \frac{T}{T_v}} - \arctg \frac{(2sh\xi \frac{T}{T_v} + K_o K_n F \frac{T}{T_v} e^{-\frac{\xi T}{T_v}}) \sin \omega T}{2(ch\xi \frac{T}{T_v} \cos \omega T - \cos a \frac{T}{T_v}) + K_o K_n \times} \rightarrow \quad (6.5)$$

$$\leftarrow \frac{1}{\times F \frac{T}{T_v} (\cos a \frac{T}{T_v} - \frac{\xi}{a} \sin a \frac{T}{T_v} - e^{-\frac{\xi T}{T_v} \cos \omega T})}.$$

Амплітудно-частотна та фазово-частотна характеристики для $G_0^*(z)$ з (6.3) мають вид

$$A_o(\omega) = K_n \sqrt{\frac{(1 - \omega^2 T_v^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 T_v^2}{(1 - \omega^2 T_v^2)^2 + \omega^2 T_v^2 (2\xi + K_o K_n)^2}},$$

$$\varphi_o(\omega) = \arctg \frac{2\xi \omega T_v}{1 - \omega^2 T_v^2} - \arctg \frac{\omega T_v (2\xi + K_o K_n)}{1 - \omega^2 T_v^2}. \quad (6.6)$$

Відповідно до [185-187], фактор пульсацій системи заглушення визначається по формулі

$$F^{-1} = 1 + \frac{1}{T} \lim_{p \rightarrow \infty} pG(p) + \sum_{i=1}^n \frac{K_i (\omega_0 T_i \operatorname{ctg} \alpha_0 - 1)}{1 + (\omega_0 T_i)^2} \left(\frac{T}{2T_i} \operatorname{ctg} \frac{T}{2T_i} - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} \right) \quad (6.7)$$

де $T = \frac{2\pi}{m}$ - інтервал дискретності; ω_0 - кругова частота живильної

мережі.

Наявність перекручувань частотних характеристик F ускладнює протікання динамічних процесів в у контурах регулювання основних координат перетворювача (струм, напруга). Крім того, зміна величини несиметрії й частоти живильних мереж викликає зниження ефективності й самої замкнутої системи заглушення.

Структурна схема пропонованої в [185-187] інваріантної системи заглушення завад наведена на рис. 6.2.

На структурній схемі зовнішні збурюючі впливи U_{vy} і U_{vc} ураховують вплив на перетворювач несиметрії керування й несиметрії живильної мережі. Параметричний зв'язок по похідній сигналу керування враховує зміну фактора пульсацій у процесі регулювання перетворювача

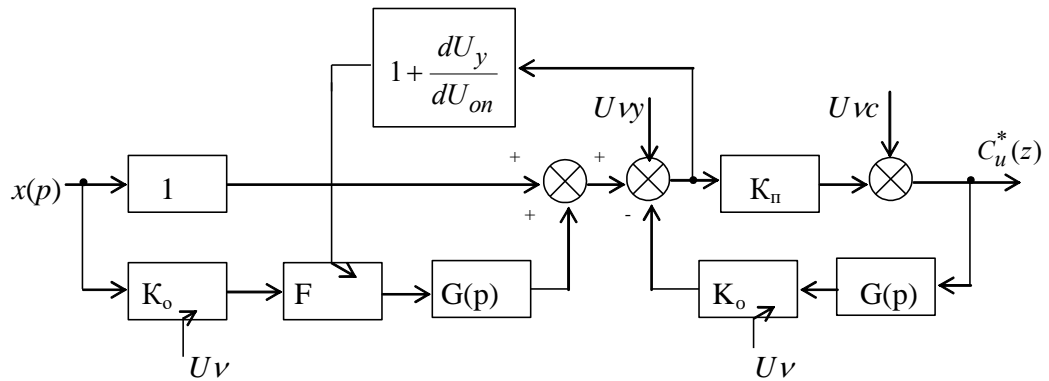


Рис. 6.2. Структурна схема інваріантної системи заглушення завад

Відсутність параметричного виходу в розглянутій системі, сигнал якої дорівнює поточному відхиленню узагальненої постійної часу перетворювача, викликаною зміною фактора пульсацій F залежно від поточного співвідношення корисний сигнал/шум, ускладнює адаптацію параметрів настроювання КК РО до зміни інерційності системи заглушення, що є недоліком розглянутого методу.

Необхідне збільшення швидкості руху поїздів і удосконалення експлуатації засобів рекового транспорту [1] потребують створення нових систем інтервального регулювання, систем керування заданою швидкістю РО за рахунок незалежного регулювання частоти безколекторних тягових двигунів і плавної зміни напруги на навантаженні методами частотно-широкоімпульсної модуляції. Незалежне регулювання частоти й напруги забезпечують економічне регулювання сил тяги й гальмування РО. Однак використання імпульсних випрямно - інвертуючих перетворювачів і формування з їхньою допомогою струмів

заданої форми, привело до збагачення гармоніками спектру гармонік тягового струму. Ці гармоніки знаходяться у діапазонах частот смугових фільтрів мікропроцесорних шляхових приймачів (МШП) рейкових кіл (РК), що формують задані режими роботи основних систем автоматичного керування швидкістю руху й гальмуванням РО. Звідси є актуальною проблема побудови малочутливих, робастних і адаптивних фільтрів і диференціаторів для підвищення завадостійкості перспективних КК для РО.

6.2. Дослідження завад, які викликаються рейковими колами

Основними датчиками на станціях та перегонах, що надають інформацію про технологічні процеси рейкового транспорту, є рейкові кола (РК). Розглянемо розповсюджені РК, які представлені на рис. 6.3 та рис. 6.4 [171-177].

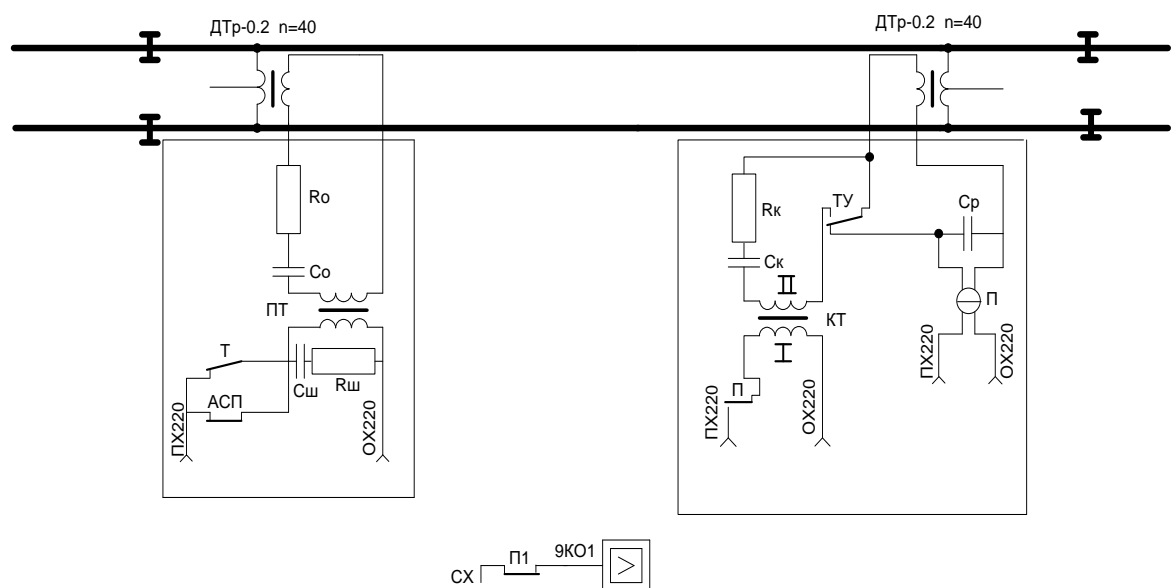


Рис. 6.3. Кодоване рейкове коло з двома дросельтрансформаторами.

На рис. 6.3 наведена схема кодованого двониткового рейкового кола з двома дросель-трансформаторами і реле типу ДСШ-15. Апаратура живлення і колійне реле розміщені у приміщенні поста централізації. Коло R_o , C_o забезпечує шунтову чутливість, виконуючи функцію обмежувача.

Численне значення R_o залежить від довжини кабелю, а C_o – від довжини рейкового кола.

Для захисту контакту трансмітерного реле Т використано іскрозахисний контур $R_{ш}$, $C_{ш}$. Конденсатор C_p на релейному кінці компенсує реактивні витрати у рейковому колі і забезпечує кращі фазові співвідношення.

На рис. 6.4 наведена схема розгалуженого рейкового кола з дросель-трансформаторами ДТ-0.2 по головному ходу і релейним трансформатором ПРТ-А на розгалуженні.

Кодування здійснюється по головній колії в обох напрямках. Довжина кола складається з трьох частин $a_1 + a_2 + b_2$, причому розгалуження повинні бути розташовані на відстані не більше 200 м.

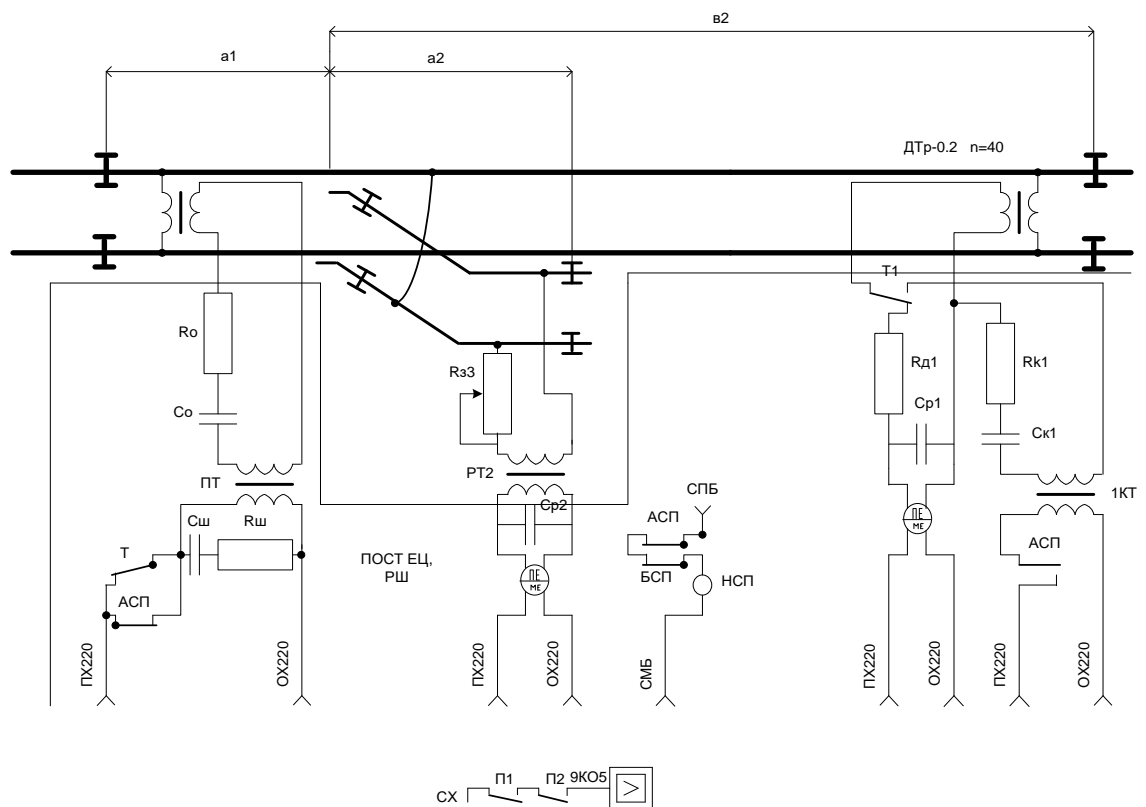


Рис. 6.4. Розгалужене рейкове коло

Для контролю нерозгалужених та розгалужених рейкових кіл використовуються однополярні входи контролера. Для нерозгалуженого

кола (рис. 6.3) використовується підключення контактів колійних реле до входів контролерів (контакт 9КО1) шляхом підключення через них полюсів живлення СХ.

У випадку розгалуженого кола (рис. 6.4) використовується послідовне з'єднання контактів всіх колійних реле, які контролюють рейкове коло, тобто на відміну від попереднього випадку на вхід контролера (контакт 9КО5) подається полюс живлення через два послідовно з'єднаних контакти. Для кожного рейкового кола використовується один вхід для забезпечення їх контролю. На сучасному етапі розвитку залізничного транспорту в умовах входження України в єдині Європейські транспортні коридори при збільшенні швидкості руху поїздів підвищення якості оперевізного процесу шляхом удосконалювання систем інтервального регулювання руху поїздів (ИРДП) нерозривно пов'язане зі створенням економічних і надійних електричних рейкових кіл (РК), що мають розширені функціональні можливості.

З урахуванням визначальної ролі РК у забезпеченні автоматизації ПП і досягнення його безпеки, постійно ведуться роботи з їхнього розвитку й удосконалювання. Розширення функціональних можливостей РК при підвищенні їхньої надійності й економічності нерозривно пов'язане зі створенням мікропроцесорних приймачів сигналів (МПП) з удосконаленим алгоритмом обробки сигналу з врахуванням реальної якості електричної енергії та високого рівня рівня завад, які впливають на функціонування КК.

Фактори, які впливають на роботу КК та формуються РК, у загальному випадку можна класифікувати відповідно до табл. 6.1.

Опір ізоляції рейкової лінії. Опір ізоляції рейкової лінії є функцією багатьох параметрів, які важко піддаються врахуванню й контролю. Основними з них є: перехідний опір рейка-шпала, опір шпал, баласту, земляної

призми й цілий ряд складових, що входять у ці елементи. Для одержання більше точних виражень визначальне значення провідності окремих елементів рейкової лінії доцільно використовувати інтегральний метод і раніше отримані вираження [184, 188-190].

Залежно від кліматичних умов і стану верхньої будови колії питомий опір ізоляції рейкової лінії може коливатися в широких межах від десятих часток до сотень Ом·км.

Таблиця 6.1

Фактори, що впливають на роботу рейкових кіл

Кліматичні	Механічні	Електричні
Зміна поточного значення опору ізоляції в результаті зміни вологості баласту	Зміна рівня сигналу в результаті зміни ординати поїзного шунта	Завади тягового струму виникаючі на тягових підстанціях
Зміна електричних характеристик приємопередаючих пристроїв у результаті зміни температури навколишнього середовища	Зміна перехідного опору рейка-колісна пара	Завади тягового струму виникаючі в результаті роботи електрорухомого складу
	Зміна опору рейкової петлі в результаті ушкодження стикових з'єднувачів	Завади від заземлених джерел електричної енергії
	Зменшення мінімального опору ізоляції в результаті забруднення баласту	Завади в результаті висвітлення й обігріву вагонів
	Зміна опору рейкової петлі в результаті ушкодження рейки	Завади від грозових розрядів
		Завади від ліній електропередач
		Завади в результаті роботи підприємств, зварювальних апаратів і ін.
		Завади від суміжних рейкових кіл
		Завади від АЛСН

З врахуванням заземлюючих пристроїв еквівалентний опір ізоляції $r_{i\omega}$ визначається з вираження:

$$r_{uz} = 0,5r_{u\min} + \frac{0,5r_{u\min} \cdot r_{zy\min}}{0,5r_{u\min} + r_{zy\min}}, \quad (6.8)$$

де r_u – опір ізоляції,

r_{zy} – опір заземлюючих пристроїв.

Опір поїзного шунта. Слід зазначити, що для безстикових РК ордината знаходження поїзного шунта в значній мірі впливає на рівень сигнального струму в МПП, у зв'язку із цим в існуючих типах тональних РК виникає необхідність зон додаткового шунтування.

У загальному випадку опір поїзного шунта, складовими частинами якого є опір колісних пар і перехідний опір колісна пара-рейка, є випадковою величиною. При цьому, імовірнісна модель поїзного шунта, що рухається, може бути представлена у вигляді незалежних дискретних послідовностей, які відповідають певним ділянкам стаціонарності, кожна з яких може бути описана емпіричною функцією щільності розподілу [180-184].

Опір рейкової лінії. Найбільше повно питомий опір рейкової лінії z_p можна представити у вигляді [184]:

$$z_p = 2 \left(kr_a + \sum_0^n r_{ac} \right) + j\omega \left[L_e + 2 \left(kL_i + \sum_0^n L_c \right) \right] \cdot 10^{-3}, \quad (6.9)$$

де r_a - питомий активний опір рейкової нитки без обліку опору стиків;

r_{ac} - активний опір одного стикового з'єднувача;

$n = \frac{1000}{l_{36}} - 1$ - число стикових з'єднувачів у 1 ому кілометрі рейкової

нитки;

l_{36} - довжина ланки, м;

$k = \frac{1000 - nl_c}{1000}$ - коефіцієнт, що визначає відносну довжину цілої

рейкової нитки на 1 км;

l_c - відстань між точками закріплення стикового з'єднувача, м;

L_e - зовнішня індуктивність рейкової петлі, мГн/км;

L_i - внутрішня індуктивність цілої рейкової нитки, мГн/км;

L_c - індуктивність одного стикового з'єднувача, мГн.

Оскільки відомі формули розрахунку окремих складових z_p не враховують всіх впливаючих факторів, то на практиці використовуються значення z_p , отримані експериментальним шляхом. При цьому питоме значення опору рейкової нитки при змінному струмі змінюється на 15-25% за модулем й 3-50% за по аргументом .

Електричні завади. Залежно від амплітуди, частоти й тривалості завад їхній вплив на функціонування КК можна розділити на небезпечний й та заважаючий.

Небезпечний вплив характеризується небезпекою для життя й здоров'я обслуговуючого персоналу, порушенням умов безпеки руху поїздів - можливістю потенційної катастрофи, наприклад, через появу дозволяючи показання світлофора замість забороненого.

Заважаючі, завади можуть знизити пропускну спроможність ділянки залізничної лінії без порушення умов безпеки руху поїздів.

По характеру впливу джерела завад, у загальному випадку, можна розділити на імпульсні й стаціонарні - з повільною зміною параметрів.

Слід зазначити, що вплив струму завади на МПП визначається нерівномірним його розподілом уздовж рейкової лінії, що має імовірнісний характер.

У загальному випадку виділяють ємнісні, поздовжню й поперечну асиметрії.

Ємнісна асиметрія обумовлена неоднаковим розташуванням рейок стосовно поверхні баласту, внаслідок низької ізоляції рейкових ниток вона незначна і нею можна зневажити.

Поздовжня асиметрія - асиметрія активних і індуктивних опорів рейкових ниток, визначається станом рейок і стикових з'єднувачів.

Поперечна асиметрія - асиметрія провідностей ізоляції рейкових ниток, як правило, виникає внаслідок витоку струму в землю через заземлюючі пристрої, що підключаються до рейок.

У загальному випадку коефіцієнт асиметрії K_a визначається з виразу:

$$K_a = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}, \quad (6.10)$$

де I_1 й I_2 - відповідно струми в першій і другий рейкових нитках.

Завади від грозових розрядів. Завади виникаючі в результаті перенапруги, викликані грозовими блискавичними розрядами, супроводжуються, як правило, швидко протікаючими перехідними процесами, при яких швидкість зміни струму може досягати 300 ка/мкс.

Значення грозових імпульсних напруг у контактній мережі можуть перевищувати значення, передбачені діючими стандартами, за рахунок перенапруг у самій мережі.

Значення комутаційних імпульсних напруг при їхній тривалості на рівні 0,5 амплітуди імпульсу (1000-5000 мкс), при номінальній напрузі мережі 3 кВ може досягати 15,5 кВ, а у випадку знаходження напруги мережі в межах від 20 кВ до 35 кВ - від 85,5 кВ до 148 кВ. Імовірність перевищення значень комутаційних імпульсних напруг становить не більше 5%.

У результаті малої ефективності існуючих зовнішніх систем грозового захисту "мішенями" для влучення блискавки служать рейки. Для ефективної боротьби із зазначеними завадами розроблений й успішно застосовується пристрій захисту КЗУ-РШ. Крім цього, при розміщенні приймально-передавальної апаратури рейкового кола в релейних приміщеннях своєрідним фільтром для зазначених електромагнітних завад служить сигнальний кабель [177, 184].

Вплив електричної дуги на струмознімачі електровоза. Аналіз впливу електричної дуги на струмознімачі електровоза показав, що значення амплітуди ударного струму в ланцюзі електровоза становить приблизно 385 А, середньоквадратичне відхилення - 83 А, максимальні кидки струму в перехідному режимі досягають 610 А, а середній час перехідного процесу 0,5-0,6 с. При цьому в спектрі струму електровоза домінують перша гармоніка 50 Гц, третя 150 Гц, а також з'являються гармоніка 100 Гц і субгармоніка 25 Гц [184].

Завади тягового струму, що виникають на тягових підстанціях. Основними причинами появи гармонік постійного й змінного тягового струму на підстанціях є: робота випрямляча з неповним числом анодів, асиметрія фазних напруг, ушкодження або відключення резонансних контурів у фільтрі.

При використанні електричної тяги по системі постійного струму основні завади виникають на частотах 300, 600, 900, 1200 Гц і т.д. При цьому значення завад у відсотковому вираженні від значення постійної складової залежно при різних частотах надані у табл. 6.2.

Таблиця 6.2.

Значення завад на тяговій підстанції при електротязі постійного струму

f_i , Гц	50	100	150	200	250	300	600
% від постійної складової I	0,9	0,4	0,6	0,8	1,1	12,5	5,4

Слід зазначити, що одним з основних джерел завад є вихідні модулі тягових перетворювачів електрорухомого складу. При цьому на мережі залізниць України знаходиться застосування як морально й фізично застарілий електрорухомий склад виробництва Радянського союзу й

інших країн 60-х -80-х років, так і сучасний вітчизняного й закордонного виробництва.

При розробці нових систем інтервального регулювання руху поїздів і, у першу чергу, мікропроцесорних приймачів РК необхідно враховувати рівні завад, створювані всіма видами електрорухомого складу вітчизняного й закордонного виробництва, а також вимоги пропоновані в різних країнах до значень завад.

6.3 Дослідження завад, створюваних електричними агрегатами РО у рейкових лініях

Одним з основних джерел завад, що викликають небезпечні впливи на функціонування для РО є вихідні модулі тягових перетворювачів РО [177-188].

У зв'язку із цим при розробці нових систем інтервального регулювання руху поїздів і, у першу чергу, мікропроцесорних РК необхідно враховувати рівні завад, що викликаються РО.

Якість електричної енергії визначається сукупністю її характеристик і повинна відповідати вимогам Держстандарту 13109-97. При цьому стандартом не встановлюються вимога до якості електричної енергії в електричних мережах спеціального призначення, до яких відносяться й системи електроживлення РО, а так само й вимоги до якості електричної енергії у форс-мажорних обставинах.

Завади, що виникають при перетворенні струму в тяговому ланцюзі локомотивів. Як відомо, частота основної гармоніки, викликані комутаціями в машинах постійного струму, визначається зі співвідношення [184]

$$f = \frac{pn}{30}, \text{ Гц.} \quad (6.11)$$

Наприклад, на електропоїзді ЕР2 застосовується динамомотор ДК-604В, сполучений з чотирьополосним генератором постійного струму з

номінальною частотою обертання 1000 хв^{-1} ($p=2, Z=45$). З врахуванням частота основної гармоніки змінної складової $\sim 66,6 \text{ Гц}$. На електровозі ВЛ8 у якості генератора ланцюгів керування використовується чотириполюсний генератор ДК-405К ($p=2, Z=26$) з номінальною частотою обертання 875 хв^{-1} . На основі частота основної гармоніки складе $58,4 \text{ Гц}$. На електровозі ВЛ10 як генератор ланцюгів керування використовується чотириполюсний генератор ДК-405К ($p=2, Z=26$) з номінальною частотою обертання 990 хв^{-1} . Для нього частота основної гармоніки складе 66 Гц .

Величини амплітуд комутаційних завад для колекторних машин різних типів приблизно однакові й в основному визначаються параметрами щіток, швидкістю їхнього ковзання по колектору, станом щіток і поверхні колектора. Середнє спадання напруги на щітковому контакті при швидкості 15 м/с і щітках марки ЭГ-2А - широко застосовуваних на електрорухомому складі становить $1,2 \text{ В}$, а різниця між максимальним і мінімальним значеннями спадання напруги становить $0,7 \text{ В}$. При цьому, у випадку значного збільшення швидкості й збільшеного перехідного опору контакту « щітка-колектор» можливі значні сплески спадання напруги до $10-12 \text{ В}$ [184]. У частотному спектрі завад значно переважають завади в діапазоні $0-350 \text{ Гц}$.

Слід відмітити наявність поздовжніх й поперечних пульсації магнітного потоку, які створюють пазові й зубцові завади, частота яких залежить від частоти обертання якоря й кількості пазів. Для тягового двигуна НБ-418^К у основних робочих режимах спектр завад перебуває в діапазонах: $0-385 \text{ Гц}$, $850-1100 \text{ Гц}$ і $170-2200 \text{ Гц}$.

Відомо, що частота пазових завад генераторів керування для ДК-604 В становить і $f_{III} \approx 1500 \text{ Гц}$ для ДК-405К - $f_{III} \approx 759 - 858 \text{ Гц}$, тобто частота основної гармоніки пазових завад генератора керування в 2-3 рази менше частоти завад, що наводяться тяговим двигуном [179-181].

При використанні системи змінного тягового струму використовується тиристорний перетворювач, що є основним джерелом завад.

Амплітуди гармонійних складових у спектрі вихідних частот залежать від схеми керування й кута включення тиристорів і можуть бути визначені по відомій методиці [185-187].

Відомо, що в частотному спектрі завад при симетричному режимі роботи випрямляча відсутні постійна складова й всі парні гармоніки [169]. При цьому косінусоїдальна й синусоїдальна складові визначаються з виражень

$$a_k = \frac{2}{\pi} \left\{ \int_{\gamma/2}^{\gamma} \left[\frac{I_d}{k_T} - \frac{U_m}{x_a} (1 - \cos \omega t) \right] \cdot \cos k\omega t \cdot d\omega t + \int_{\gamma}^{\pi} \left(-\frac{I_d}{k_T} \right) \cos k\omega t \cdot d\omega t + \int_{\pi}^{\pi+\gamma/2} \left[-\frac{I_d}{k_T} + \frac{U_m}{x_a} (1 + \cos \omega t) \right] \cdot \cos k\omega t \cdot d\omega t \right\}; \quad (6.12)$$

$$b_k = \frac{2}{\pi} \left\{ \int_{\gamma/2}^{\gamma} \left[\frac{I_d}{k_T} - \frac{U_m}{x_a} (1 - \cos \omega t) \right] \cdot \sin k\omega t \cdot d\omega t + \int_{\gamma}^{\pi} \left(-\frac{I_d}{k_T} \right) \sin k\omega t \cdot d\omega t + \int_{\pi}^{\pi+\gamma/2} \left[-\frac{I_d}{k_T} + \frac{U_m}{x_a} (1 + \cos \omega t) \right] \cdot \sin k\omega t \cdot d\omega t \right\}, \quad (6.13)$$

де $U_m = \sqrt{2}U_2$ - амплітудне значення вентильної напруги перетворювального трансформатора, В;

I_d - постійна складова робітника струму перетворювача, А;

k_T - коефіцієнт трансформації трансформатора.

Значення гармонійних складових тягового струму споживаного електрорухомим складом на вилученому кінці від тягової підстанції наведені в табл.6.3.

При роботі електрорухомого складу в режимі рекуперативного гальмування значення гармонік підвищується, у середньому на 20%.

Розглянемо комутаційні завади. Аналіз схем керування електрорухомого складу, що найбільше широко експлуатується на

залізницях України - ЧС2, ЧС4, ВЛ8, ВЛ10, ВЛ80 свідчить, що при дослідженні комутаційних завад виникаючих при комутації контакторів типу МК310 варто враховувати послідовність імпульсів тривалістю порядку 20 мс і з інтервалами порядку 70 мс [112, 169].

У випадку експлуатації електрорухомого складу постійного струму з тиристорними перетворювачами рівень і спектр частот гармонійних складових тягового струму значно збільшується, оскільки поряд з основними гармоніками частоти регулювання з'являються й гармонійні складові комбінаційних частот. При цьому максимальні амплітуди завад залежать від частоти й під час пуску тягових двигунів можуть досягати значень представлених у табл. 6.4. [169].

Слід зазначити, що на мережі залізниць України обертається не тільки електрорухомий склад вітчизняного виробництва, але й закордонного. Крім цього залізниці України припускають закупівлю нових сучасних видів елетроподвижного сполуки для перевезення пасажирів типу Pendolino.

Розглянемо рівні завад і відповідні вимоги пропоновані за рубежем до електрорухомого складу.

З 2000 р. перебуває в експлуатації залізничний перехід через протоку Ересунн, оснащений спеціально розробленими шведськими електропоїздами Х2.

Таблиця 6.3

Значення гармонійних складових тягового струму

Частота гармоніки, Гц	Значення струму гармонік, А	
	При одноколіній ділянці	При двоколіній ділянці
50	147	147
150	36,75	36,75
250	13,08	12,24
350	5,00	4,46
450	3,50	3,04
550	2,25	1,93
650	1,62	1,34
750	1,17	0,96
850	0,90	0,73
950	0,71	0,57
1050	0,54	0,43
1150	0,40	0,32
1250	0,34	0,26
1350	0,28	0,22
1450	0,25	0,20
1550	0,23	0,17
1650	0,21	0,16
1750	0,19	0,14
1850	0,18	0,13
1950	0,16	0,12
2050	0,15	0,11

Таблиця 6.4

Максимальні амплітуди завад під час пуску тягових двигунів

Частота завади, Гц	5	10	15	25	75	125	175	225	275
Максимальна амплітуда завади, А	4,7	1,1	6,2	3,8	2,6	2,0	3,4	2,6	2,2

При цьому значення струмів гармонік на стороні 25 кВ, що виникають у результаті проходження електрорухомого складу при самій несприятливій схемі високовольтної мережі, а також значення відносних напруг гармонік і їхні припустимі значення на стороні 132 кВ до установки фільтру представлені в табл. 6.5. [184, 192].

Установлення фільтрів на тягових підстанціях, як це було на підстанції Лернаккен, при придбанні зазначених електропоїздів, не вирішує виникле питання зі значним зменшення значення гармонійних складових, оскільки основним їхнім джерелом є вхідні модулі тягових перетворювачів електрорухомого складу, пристрої яких давно не вдосконалилися [117, 179, 192].

На мережі залізниць Німеччини - DBAG розроблені правила технічного допуску на мережу - електротехнічні критерії сумісності з мережею, дії яких поширюються на весь електрорухомий склад розроблений і виготовлений після набрання чинності зазначеними правилами [118]. Ці критерії розділені на два частотних діапазони: 40-102 Гц і 6940-16860 Гц.

У першому діапазоні припустимий час тривалості завад становить не менш 500 мс, а в другому - не менш 40 мс.

Гранично припустимі значення струмів гармонік - завад для окремої тягової одиниці, а так само для комплексу тягових одиниць наведені в табл. 6.6.

На Федеральних залізницях Австрії вимоги до максимально припустимих параметрів завад розділені на три частотних діапазони: 93-106 Гц, 3850-10100 Гц, 28-57 кГц.

При цьому в першому частотному діапазоні мінімальний час тривалості завад становить 3000 мс, у другому - 5 мс, а в третьому частотному діапазоні - не визначається.

Вимоги до параметрів завад застосовувані на російських залізницях (РЗ) представлені на рис. 6.5. У них не нормується час припустимих завад [184].

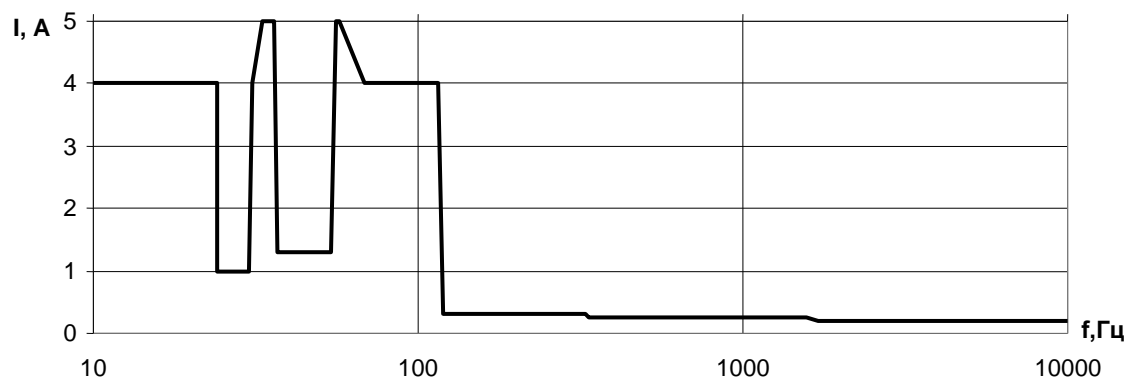


Рис. 6.5.Вимоги до параметрів завад на РЗ

Вимоги до параметрів завад застосовувані на залізницях Італії (FS) представлені на рис. 6.6. У них, як і у вимогах пропонованих на РЗ, не нормується час припустимих завад .

Таблиця 6.5

Значення струмів і відносних напруг гармонік

№ гармоніки	Частота гармоніки, Гц	Струм гармоніки, А	Відносна напруга гармоніки в мережі 132 кВ, %	
			Розрахункове	Гранично припустиме
3	150	15	0,09	0,1
5	250		0,22	
7	350	9,5	0,14	
9	450	4	0,15	
11	550	1,6	0,33	
13	650		0,05	
15	750		0,03	
17	850	3	0,04	
19	950	5	0,11	
21	1050	6	0,2	0,7
23	1150	9	0,51	
25	1250	7	0,38	
27	1350	6	0,22	
29	1450	5	0,13	0,6
3	1550	7		
33	1650	8	0,1	
35	1750	6	0,05	
37	1850	4,2	0,04	0,5
39	1950	1,6	0,03	
41	2050		0,28	
43	2150		0,03	
45	2250	3,2	0,1	
47	2350	4,8	0,29	
49	2450	6,4	0,71	

Таблиця 6.6

Припустимі значення струмів завад

Середня частота каналу, Гц	Ширина смуги 3 дБ, Гц	Максимально припустимі струми завад для смуги 3 дБ, мА	Максимально припустимі струми завад для вимірювальної смуги 120 Гц, мА
для окремої тягової одиниці, а так само для комплексу об'єднаних до складу			
4750	200	1000	790
5250	206	1000	780
5750	214	1000	770
6250	220	1000	750
для окремої тягової одиниці			
9500	410	113	64
10500	500	104	53
11500	535	91	45
12500	535	86	39
13500	656	71	34
14500	660	67	30
для комплексу тягових одиниць об'єднаних до складу			
7000	195	106	86
8000	235	95	70
10000	280	74	50
12150	330	59	37
14600	375	48	29
16800	460	44	24

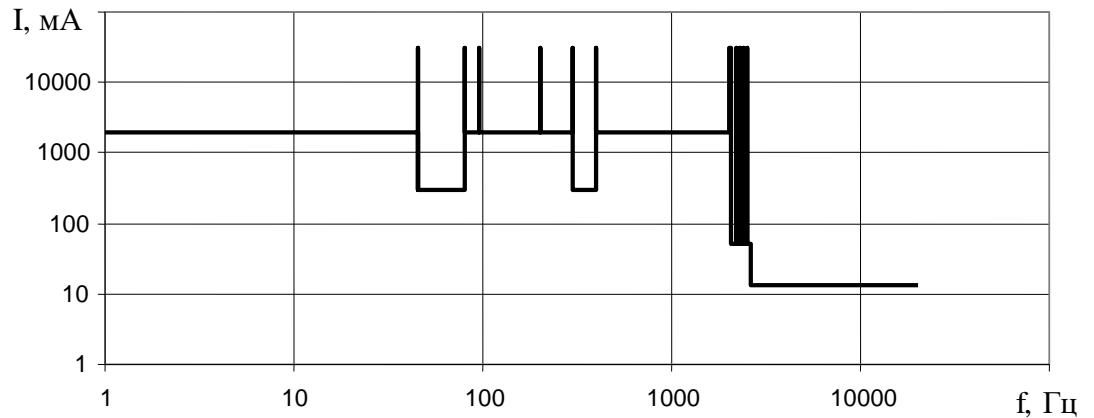


Рис. 6.6. Вимоги до параметрів завад на FS

Таким чином, для рейкового транспорту залізниць Європи характерна відсутність єдиного підходу до нормування таких завад. Це підтверджує необхідність урахування завад в КК для РО.

Реально в РК діють завади, які за своєю статистичною структурою відрізняються від флуктуаційних. Найбільш потужними є зосереджені за спектром завади. Відмінною рисою таких завад є їх квазідетермінований характер і, як наслідок, досить високий кореляційний зв'язок між окремими відліками процесу.

Для зменшення дій завад на вході шляхових приймачів установлюють смуговий фільтр, що обмежує спектр завад. Однак застосування таких фільтрів не руйнує статистичну структуру завад, що знижує завадостійкість приймачів і як наслідок впливає на функціонування КК.

6.4. Розроблення методу адаптивної фільтрації сигналів у КК для рухомих одиниць

Вище показана наявність у КК різних завад, причому можна зробити висновок, що їх частотні складові знаходяться у більш високочастотному діапазоні у порівнянні із корисними сигналами, що задають швидкість РО.

6.4.1. Розроблення адаптивного фільтру

Під адаптивною фільтрацією будемо розуміти виявлення, виділення, відновлення й перетворення вхідних корисних сигналів із суміші сигнал–завада при наявності завад змінної інтенсивності в умовах, коли заздалегідь невідомі характеристики сигналів і завад.

Якщо корисний сигнал та завади відомі і незмінні, то побудувати оптимальних фільтр, (наприклад, фільтр Вінера [83]), неважко. Але при зміні характеристик (і їхніх оцінок) випадкових корисних сигналів і випадкових завад оптимальність порушується.

У цьому випадку оптимальний фільтр не може бути побудований заздалегідь, якщо апріорна інформація про вхідні впливи недостатня. Саме в цих випадках, наприклад у роботах [31, 83, 84, 89, 195, 197], виникає завдання побудови адаптивних фільтрів, що пристосовуються до невідомим та змінюючихся, умов роботи.

Пристосування, або адаптація можуть, здійснюватися шляхом цілеспрямованої зміни параметрів фільтру, а якщо це необхідно, те і його структури. При цьому критерій оптимальності, що характеризує роботу фільтру, досягає екстремума (наприклад, мінімуму квадратів відхилення рівнів оцінок неспотвореного сигналу від перекрученого завадами).

Цей підрозділ присвячений розгляду відомих фільтрів [31, 83, 84, 89, 185-197] і розробленню методу побудови адаптивних фільтрів, призначених для рішення різних завдань фільтрації, з метою спрощення структури КК та зменшення обсягу необхідних обчислень.

У загальному випадку оптимальний фільтр не може бути побудований заздалегідь, якщо апріорна інформація про вхідні впливи недостатня. Саме в цих випадках, наприклад у роботах [31, 83], виникає завдання побудови адаптивних фільтрів, що пристосовуються до невідомим або умов функціонування, що змінюються за рахунок зовнішніх впливів або внутрішньої структури.

6.4.2. Метод побудови фільтра за критерієм оптимальності у вигляді міри відхилення вихідної величини фільтра від бажаної функції

Нехай до входу фільтра прикладений зовнішній вплив

$$u(t) = s(t) + \zeta(t), \quad (6.14)$$

де $s(t)$ — корисний сигнал, $\zeta(t)$ - завада, причому й сигнал, і завада являють собою стаціонарні випадкові процеси з невідомими функціями розподілу. Як звичайно, передбачається, що середнє значення завади дорівнює нулю

Вихідна величина фільтра $y(t)$ - реакція фільтра на зовнішній вплив $u(t)$. Вона залежить також від структури фільтра й, зокрема, від вектора параметрів $C = (C_1, C_2, C_\mu, C_N)$. Звичайно потрібно, щоб вихідна величина фільтра в якомсь певному сенсі мало відрізнялася від бажаної функції $y_0(t)$. Бажана функція $y_0(t)$ являє собою деяке ідеальне перетворення корисного сигналу $s(t)$ (6.14), тобто результат впливу деякого оператора на $s(t)$. Це перетворення, здійснюване передатною функцією фільтра, може бути інтегруванням, диференціюванням, попередженням, згладжуванням і т.п. і повинне бути результатом пошуку критерію оптимізації міри відхилення вихідної величини фільтра $y(t)$ від бажаної функції $y_0(t)$

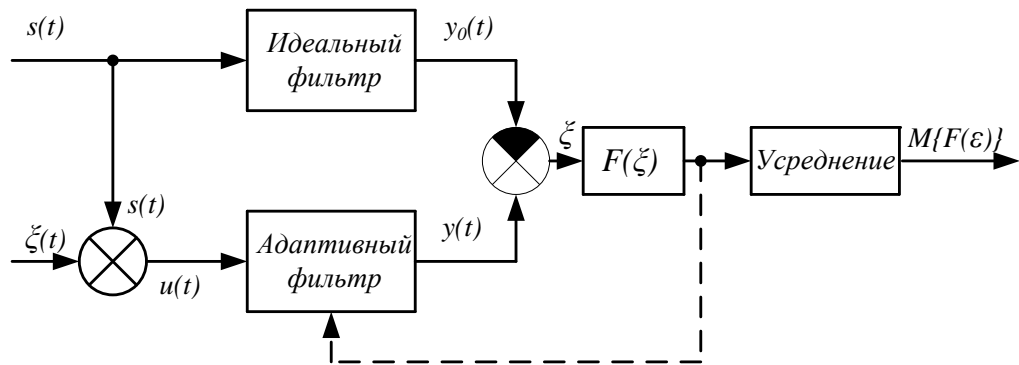


Рис. 6.7. Блок-схема адаптивного фільтру й алгоритму адаптації

Як міра відхилення вихідної величини фільтру $y(t)$ від бажаної функції $y_0(t)$ в [31] обране математичне очікування M деякої строго опуклої функції $F(\xi)$ від різниці $F(y_0(t)-y(t))$ у вигляді наступного функціонала

$$J = M\{F(y_0(t)-y(t))\}. \quad (6.15)$$

Завдання полягає у визначенні структури адаптивного фільтру й алгоритму адаптації, що забезпечують мінімізацію міри відхилення - функціонала (6.15).

Розглянемо блок-схему, показану на рис. 6.7. Тут порівнюються виходи адаптивного й ідеального фільтрів, до входів яких прикладені відповідно сигнали $u(t)$ і $s(t)$. Відхилення $\xi = y_0(t) - y(t)$ надходить на нелінійний перетворювач із характеристикою $F(\xi)$. Подаючи реалізації $F(y_0(t) - y(t))$ на спеціальний пристрій, що змінює відповідно до алгоритму адаптації вектор параметрів c^T , необхідно домогтися **мінімуму міри відхилення**.

Це завдання буде вирішена, якщо будуть знайдені відповідні алгоритми адаптації.

Вихідна величина цього адаптивного фільтру представлена у вигляді комбінації лінійно незалежних функцій від вхідного сигналу

$$u(t) = s(t), \text{ тобто } y(t) = c^T \varphi(s(t)).$$

Тоді критерій оптимальності в після підстановки вираження для $y(t)$ в (6.15) шукається у вигляді функціонала

$$J(c) = M\{F(y_0(t) - c^T \varphi(s(t)))\}. \quad (6.17)$$

Тому що градієнт реалізації дорівнює

$$\Delta F(y_0(t) - c^T \varphi(s(t))) = -F_c'(y_0(t) - c^T \varphi(s(t))) \varphi(s(t)), \quad (6.18)$$

Отриманий безперервний алгоритм адаптації коефіцієнтів настроювання фільтру

$$\frac{dc(t)}{dt} = \gamma(t) F_c'(y_0(t) - c^T(t) \varphi(s(t))) \varphi(s(t)) \quad (6.19)$$

Вибір системи лінійно незалежних функцій дозволив спростити структуру адаптивного фільтру. Цей алгоритм адаптації представлений у розгорнутій координатній формі

$$\frac{dc_\mu(t)}{dt} = \gamma(t) F_c'(y_0(t) - \sum_{v=1}^N c_v(t) \varphi_v(s(t))) \varphi_\mu(s(t))$$

$$\mu = \overline{1, N}$$

Тут для цього алгоритму прийняте

$$\varphi_v(s(t)) = s(t - \nu T_k),$$

$$\nu = \overline{1, N},$$

що здійснюється за допомогою елементів затримки Z^{-1} . Тоді

$$\frac{dc_\mu(t)}{dt} = \gamma(t) F_c'[y_0(t) - \sum_{v=1}^N c_v(t) \varphi_v(s(t))] \varphi_\mu(s(t))$$

Адаптивний фільтр спрощений шляхом вибору $F(\cdot)$ у вигляді квадратичної параболи. У цьому випадку похідна $F'(\cdot)$ — лінійна функція, і потреба в нелінійному перетворювачі відпадає. Подібного роду фільтри

на елементах затримки з успіхом використовуються в різних системах зв'язку, і керування.

Граничні функції $\varphi(\cdot)$ мають властивість «ортогональності»

$$\varphi_\nu(s(t))\varphi_\mu(s(t)) = \begin{cases} 1, & \text{при } \nu = \mu; \\ 0, & \text{при } \nu \neq \mu. \end{cases}$$

Тому алгоритм адаптації коефіцієнтів настроювання фільтру представлений наступним рівнянням

$$\frac{dc(t)}{dt} = \gamma(t)F_c'(y_0(t) - c_\mu(t)\varphi_\mu(s(t)))\varphi_\mu(s(t)), \quad (6.22)$$

або в різницевій формі

$$\frac{\partial \Delta c_\mu}{\partial t} = \frac{\Delta c_{\mu_n} - \Delta c_{\mu_{n-1}}}{T_k} = \gamma(t) \left[\frac{1}{\lambda \sigma_\xi^2} \sigma_y^2 s(t - \mu T_k) \right]. \quad (6.23)$$

Звідки, знаючи $C_\mu(t)$, отримано

$$y(t) = \sum_{\nu=1}^N C_\nu(t)\varphi_\nu(s(t)). \quad (6.24)$$

Структурну схему адаптивного фільтру, що реалізує алгоритм відповідно до (6.23), (6.24) наведено на рис. 6.8.

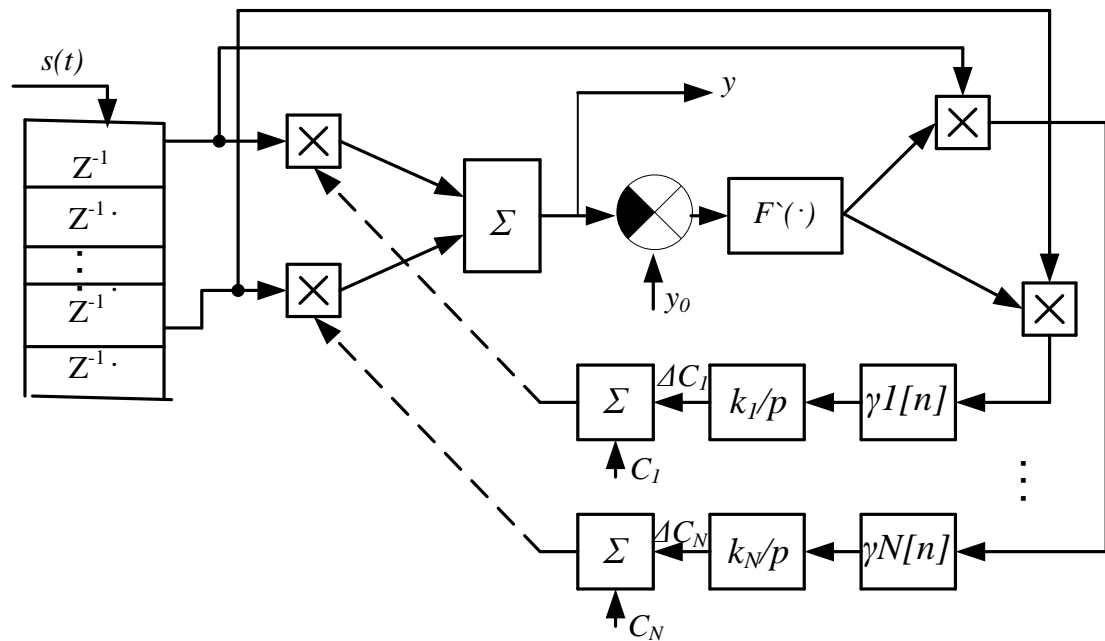


Рис. 6.8 Структурна схема відомого адаптивного фільтру

Недоліком такої процедури адаптації у фільтрі [31] є наявність у критерії оптимізації (6.15) апіорі відомого значення вихідного сигналу $y_0(t)$.

Для одержання оцінки про параметри цього сигналу у вказаних раніше методах оптимізації використовувалася попереднє накопичена й оброблена реалізація сигналів, що вимагає значних витрат часу. Таке оброблення може застосовуватися в системах моделювання й прогнозування, де часові ресурси не обмежені. У реальних умовах роботи РО на маршрутах такого резерву часу немає, тому рішення на керування повинні прийматися в ході самого перехідного процесу роботи пристроїв керування й регулювання, тому використання алгоритму оптимізації (6.15) неприйнятно.

Припустимо, що нам невідомі які-небудь характеристики сигналу $S(t)$, а також будемо вважати, що завада не корельована із сигналом і

являє собою білий шум з нульовим середнім і дисперсією σ_{ξ}^2 . Вхідний сигнал фільтру $u(t)$ являє собою випадкову адитивну суміш корисного сигналу $s(t)$ і завади $\zeta(t)$. Розглянемо фільтр на елементах затримки Z^{-1} , призначений для виділення сигналу $s(t)$. Нехай вихідний сигнал визначається в такий спосіб:

$$y(t) = \sum_{\mu=0}^N C_{\mu} e_{\mu}(t - \mu T_k) \quad (6.25)$$

де $e_{\mu}(t) = y(t) - u(t) = y(t) - s(t) - \xi(t)$ — сигнал помилки фільтрації, C_{μ} — шукані параметри фільтру.

$$y(t) = y_s(t) + y_{\zeta}(t)$$

де $y_s(t)$, $y_{\zeta}(t)$ — випадкові складові корисного сигналу та завади;

$$e_s(t) = \sum_{\mu=0}^N C_{\mu} \{y(t - \mu T_k) - S(t - \mu T_k)\}, \quad (6.26)$$

$$e_{\xi}(t) = \sum_{\mu=0}^N C_{\mu} \xi(t - \mu T_k), \quad (6.27)$$

Оскільки сигнал $S(t)$ заздалегідь невідомий, то неможливо визначити бажаний вихідний сигнал $y_o(t)$. Крім того, розглянутий фільтр не має параметричного виходу, який враховує оцінку корисний сигнал/завада і може бути використаний для підстроюки параметрів адаптивних регуляторів.

6.4.3. Розробка критерія оптимальності, який враховує енергетичні параметри сигналів

Розглянемо завдання виділення сигналу на фоні завад. Формуємо критерій оптимальності [92,93], який враховує інформацію про сигнал $S(t)$ та заваду $\zeta(t)$. Таким критерієм оптимальності може, наприклад, служити функціонал

$$J(c) = M \left\{ \left| \frac{1}{3} y^3(t) \right| - \lambda M(e_{\xi}^2(t)) \right\}, \quad (6.28)$$

де λ - постійний ваговий множник, M - математичне очікування.

Функціонал (6.28) характеризує перевищення оцінкою $\frac{1}{3} |y^3(t)|$ потужності вихідного корисного сигналу фільтру над потужністю складової вихідного сигналу, викликаною завадою. Введення $\frac{1}{3} |y^3(t)|$ дозволяє у процесі оптимізації більш ефективно придушувати завадові складові у вихідному сигналі, а при синтезі фільтру на основі диференціювання функціоналу враховувати реальні енергетичні співвідношення сигналів $y^2(t)$. Оптимальному фільтру відповідає екстремум (тому що складова $\xi(t)$ повинна прагнути до нуля) цього функціоналу.

Введений критерій оптимальності [92, 93] враховує оцінки корисного сигналу та завади (шуму).

У силу властивостей шуму $\xi(t)$

$$M(e_{\xi}^2) = \left(\sum_{\mu=0}^N (C_{0\mu}^2 \pm \Delta C_{\mu}^2) \right) \sigma_{\xi}^2, \quad (6.29)$$

де $C_{0\mu}$ - заздалегідь, випадковим чином задані, початкові значення шуканих коефіцієнтів настроювання фільтру, ΔC_{μ}^2 - сигнал корекції коефіцієнта настроювання фільтру $C_{0\mu}$.

Отже, (6.28) запишеться так:

$$J(c) = M \left\{ \left| \frac{1}{3} y^3(t) \right| - \sigma_{\xi}^2 \lambda (\Delta C_{\nu}^2 + C_{0\nu}^2) \right\}. \quad (6.30)$$

Умову екстремума одержимо, диференціюючи (6.30) по C_{μ} , і дорівнюючи часткові похідні нулю:

$$\frac{\partial J(c)}{\partial \Delta c_{\mu}} = \frac{\partial J(c)}{\partial y(t)} \frac{\partial y(t)}{\partial \Delta c_{\mu}} = M \left[y^2(t) \frac{\partial y(t)}{\partial \Delta c_{\mu}} - 2\lambda \sigma_{\xi}^2 \Delta c_{\mu} \right] = 0. \quad (6.31)$$

З огляду на (6.25), маємо

$$\frac{\partial y(t)}{\partial \Delta c_\mu} = e(t - \mu T_k)$$

з (6.31) знаходимо

$$\Delta C_\mu^* = \frac{1}{\lambda \sigma_\xi^2} M[y^2(t) e(t - \mu T_k)], \quad (6.32)$$

Вираз (6.32) указує на те, що коефіцієнти C_μ^* пропорційні значенням взаємо-кореляційної функції квадрата (потужності) вихідного сигналу фільтру й сигналу помилки фільтрації

$$\Delta C_\mu^* = \frac{1}{\lambda \sigma_\xi^2} R_{y^2 e}(\mu T_k). \quad (6.33)$$

Якщо в (6.22) підставити значення $y(t)$ з (6.25), то одержимо систему лінійних рівнянь, що і визначає оптимальне значення ΔC_μ^* .

Однак значно простіше для визначення ΔC_μ^* використовувати співвідношення (6.32) по реалізаціях. Це дозволяє виключити громіздку операцію, пов'язану з рішенням системи лінійних рівнянь. Завдання визначення ΔC_μ^* зводиться до обчислення взаємо-кореляційної функції по реалізаціях. Тому для оцінки кореляційних функцій можна одержати безперервний (або різницевий) алгоритм адаптації

$$\frac{\partial \Delta c_\mu}{\partial t} = \frac{\Delta c_{\mu_n} - \Delta c_{\mu_{n-1}}}{T_k} = \gamma(t) \left[\frac{1}{\lambda \sigma_\xi^2} \sigma_y^2 e(t - \mu T_k) \right] \quad (6.34)$$

$$T_0(t) \frac{\partial \Delta c_\mu(t)}{\partial t} = T_0(t) \frac{\Delta c_{\mu_n} - \Delta c_{\mu_{n-1}}}{T_k} = \frac{1}{\lambda \sigma_\xi^2} \sigma_y^2 e(t - \mu T_k), \quad (6.35)$$

де початкова стала часу $T_0(t) = \frac{1}{\gamma(t)}$,

n – номер такту дискретизації T_k .

Із (6.35) одержимо цифровий алгоритм пошуку шуканих коефіцієнтів настроювання фільтру

$$\Delta c_{\mu_n} = \Delta c_{\mu_{n-1}} + \frac{T_k}{T_0(t)\lambda\sigma_\xi^2} \sigma_y^2 e^{(t-\mu T_k)} = \Delta c_{\mu_{n-1}} + \frac{T_k}{T_{opt}(t)} e^{(t-\mu T_k)} \quad (6.36)$$

Уведемо позначення еквівалентної постійної сталої часу адаптивного фільтру $T_{opt}(t)$ у вигляді

$$T_{opt}(t) = \frac{T_0(t)\lambda}{\sigma_y^2} \sigma_\xi^2 = T_0(t)\lambda \frac{D_e}{D_y}. \quad (6.37)$$

Перепишемо (6.25) у іншій формі

$$T_{opt} \frac{\partial y(t)}{\partial t} = e^{(t-\mu T_k)}. \quad (6.38)$$

Ці рівняння визначають закон зміни коефіцієнтів настроювання схеми та вихідний сигнал фільтру. Структурна схема оптимального адаптивного фільтру, що визначає вихідний сигнал по рівнянню (6.34, 6.38), наведена на рис. 6.9.

Для визначення дисперсій D_y і D_e можуть використовуватися, наприклад, формули

$$D_y = \sigma_y^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N y^2[nT_k] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N y^2[nT_k] = \sqrt{R}, \quad (6.39)$$

і

$$D_e = \sigma_\xi^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N e^2[nT_k] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N+1} \sum_{n=0}^N e^2[nT_k] = \sqrt{Q}, \quad (6.40)$$

де $y^2[nT_k]$ і $e^2[nT_k]$ – квадрати решітчастих функцій вихідного сигналу $y(t)$ і помилки $e(t)$ фільтрації, T_k – період виміру функцій $y[nT_k]$ і $e[nT_k]$, $n = \overline{0, \infty}$,

\sqrt{R} і \sqrt{Q} – поточні значення оцінок рівнів спектральних щільностей корисного сигналу й завади, відповідно.

Припустимо, що всі коефіцієнти $C_\mu = C_{0\mu} \pm \Delta C_\mu$ настроюються одночасно й мають рівні значення $C_\mu = K_i T_k$. У цьому випадку вираження (6.32) приймає вигляд

$$y(t) = C_{\mu} \sum_{\nu=0}^N e_{\mu}(t - \mu T_k) = K_i T_k \sum_{\mu=0}^N e_{\mu}(t - \mu T_k), \quad (6.41)$$

де $K_i = K_{i0} \pm \Delta K_i$;

$K_{i0} = \omega_{c.kв.}$ - початкове значення параметра настроювання фільтру дорівнює середньоквадратичній частоті сполучення, яка визначає заздалегідь відому смугу пропущення випадкового корисного сигналу $S(\omega_{c.kв.})$ і коефіцієнти K_{i0} можуть бути задані заздалегідь (це є достоїнством пропонованого методу, тому що виключається установка випадковим чином заданих, початкових значень коефіцієнтів настроювання фільтру $C_{0\mu}$);

$\Delta K_i = \Delta \omega_{c.kв.}$ - сигнал на додатковому параметричному виході фільтру, що визначає діапазон зміни смуги пропущення з появою випадкової завади. Цей діапазон оцінюється співвідношенням

$$\frac{\sigma_{\xi}^2}{\sigma_y^2} = \frac{D_e}{D_y} = \frac{\sqrt{Q}}{\sqrt{R}}$$

та визначає параметр настроювання $T_{opt}(t)$ адаптивного фільтру (6.28).

Вираження (6.41) записане через Z -перетворення при $N \rightarrow \infty$, з урахуванням формули збіжної геометричної прогресії, буде мати такий вигляд

$$Y(Z) = K_i T_k \sum_{\mu=0}^N e_{\mu}(Z) Z^{-\mu} = \frac{K_i T_k}{1 - Z^{-1}} e(Z), \quad (6.42)$$

або

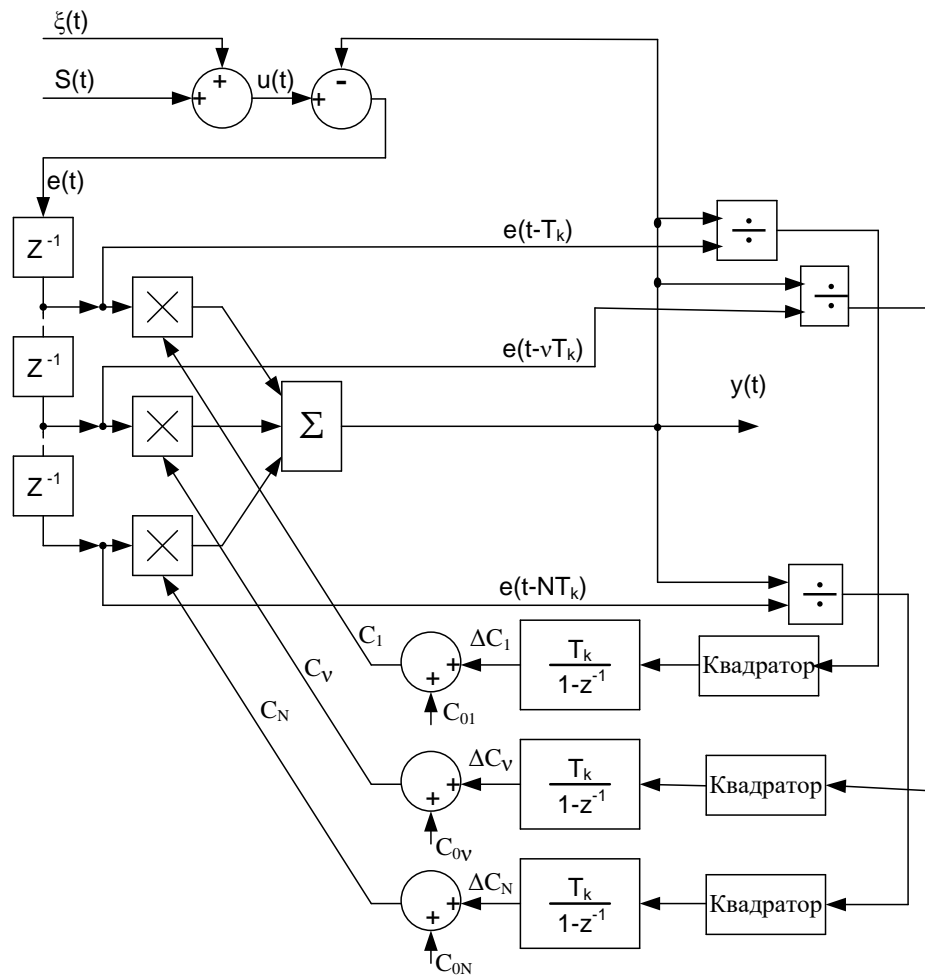


Рис. 6.9. Структурна схема оптимального адаптивного фільтру, що визначає вихідний сигнал за рівнянням (6.34)

$$Y(Z) = \frac{K_i T_k}{2} \frac{1+Z^{-1}}{1-Z^{-1}} e(Z). \quad (6.43)$$

Структурна схема запропонованого оптимального адаптивного фільтру [93], що визначає вихідний сигнал за рівнянню (6.41), наведена на рис. 6.10.

Структурна схема запропонованого адаптивного фільтру [93], побудована за рівняннями (6.33), (6.34) на рис.6.11.

На рис.6.12 наведено схему моделі фільтру.

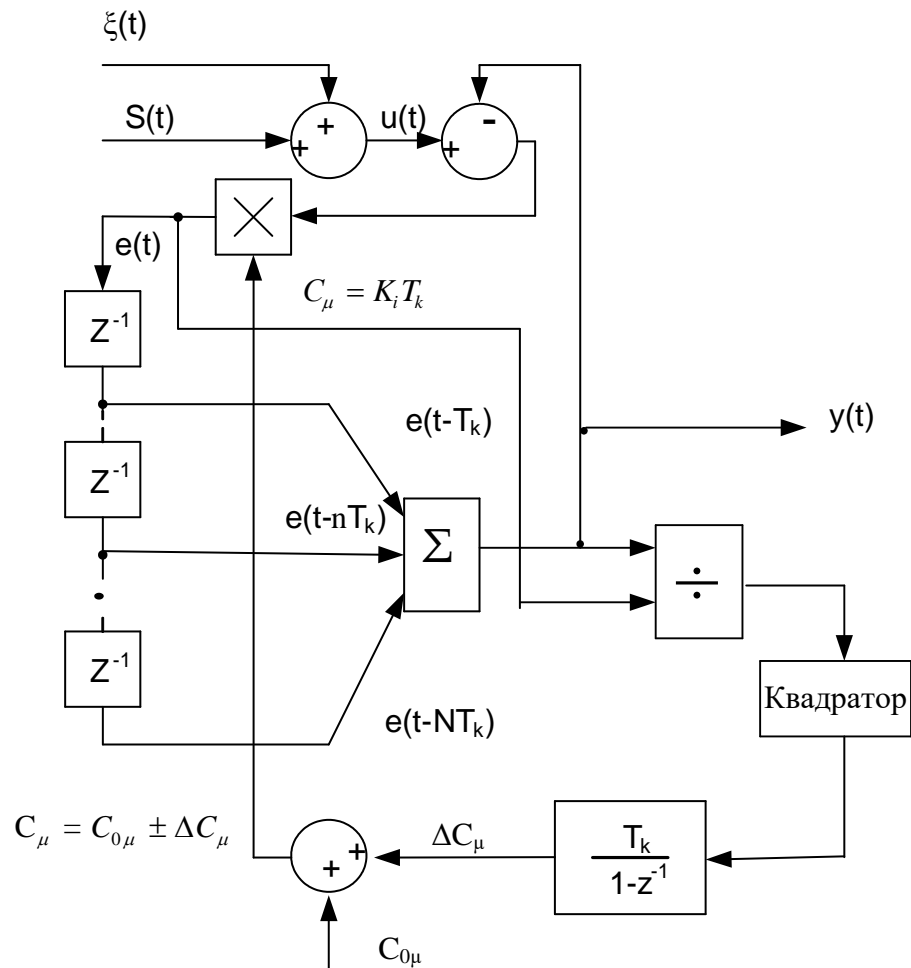


Рис. 6.10. Структурна схема запропонованого оптимального адаптивного фільтру, що визначає вихідний сигнал за рівнянням (6.41)

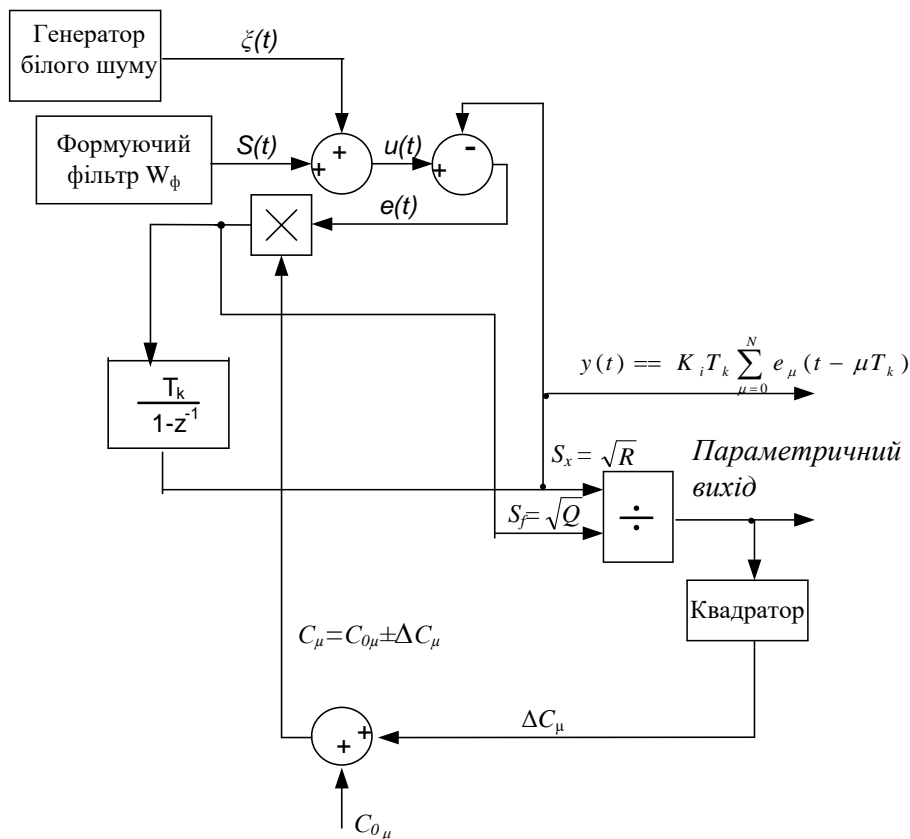


Рис. 6.11. Структурна схема запропонованого оптимального адаптивного фільтра, що визначає вихідний сигнал за рівнянням (6.33)

6.5 Дослідження моделі розробленого адаптивного фільтра

На основі теоретичних положень цього розділу розроблено модель адаптивного фільтра у середовищі MatLAB.

Дослідження фільтра виконано при різних сигналах на його вході, які являють собою адитивну сукупність корисного сигналу $S(t)$ та завади $\xi(t)$

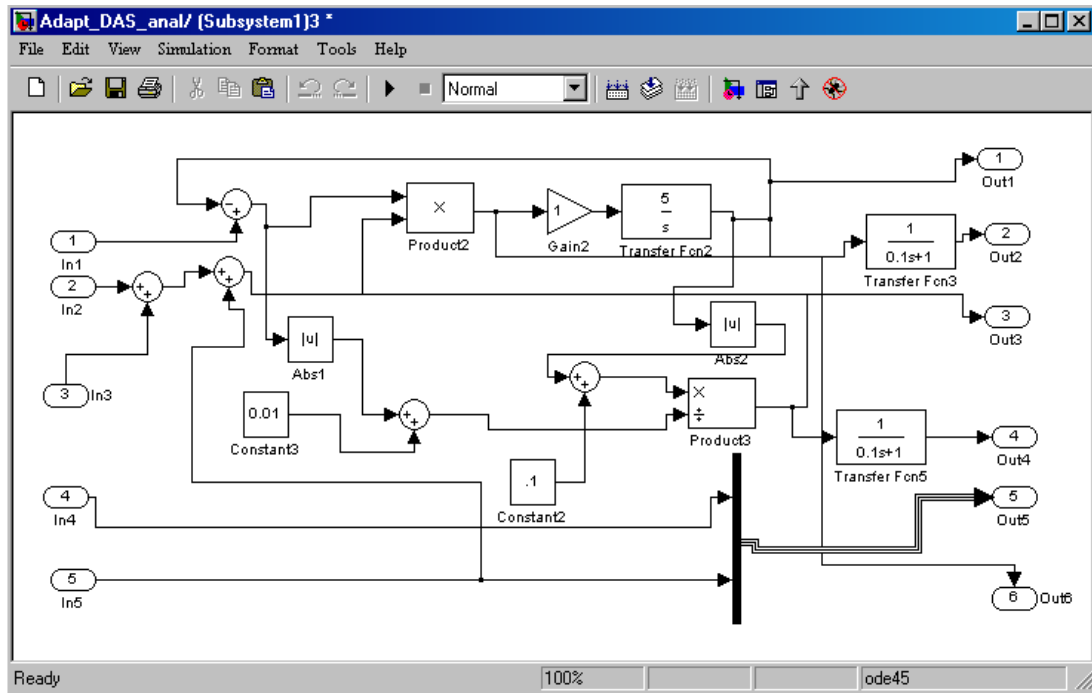
$$u(t) = s(t) + \xi(t).$$

У якості корисного сигналу обрано синусоїдальний сигнал

$$S(t) = 1 \sin 1t.$$

Сигнал завади обрано (не обмежуючи загальності) у вигляді синусоїди з більш високою частотою у порівнянні з корисним сигналом та у вигляді випадкових збурюючих сигналів. Відповідні графіки сигналів, що характеризують роботу фільтра, показані на рис. 6.13 – рис. 6.23.

a)



б)

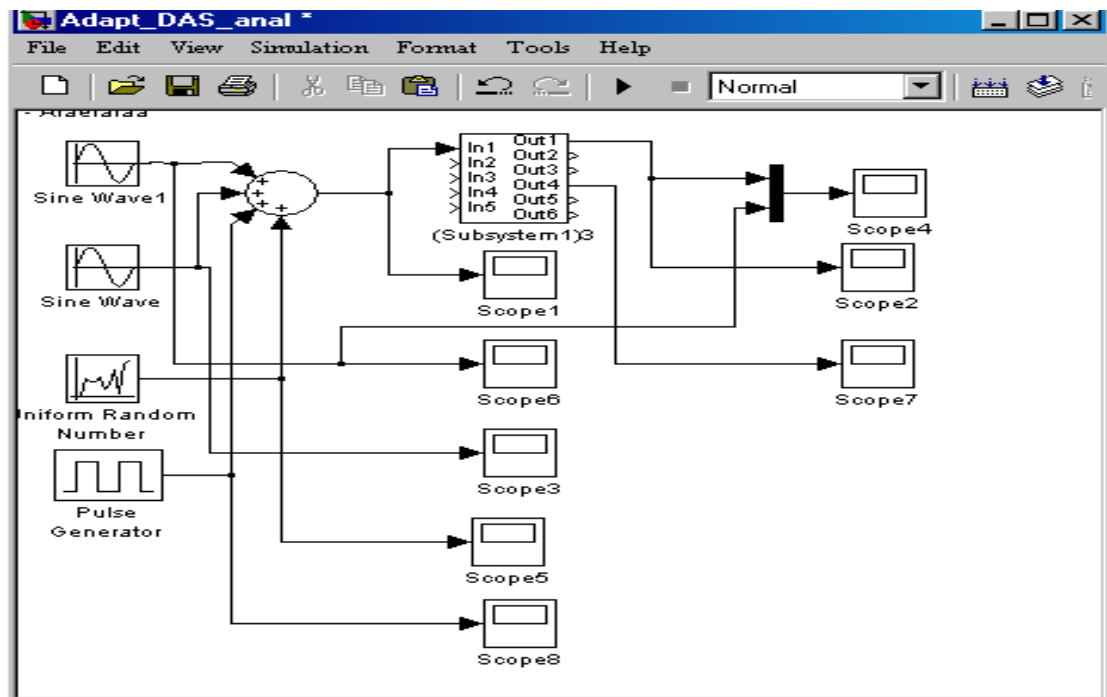


Рис. 6.12. Схему імітаційної моделі фільтра рис.6.11:

а) структура фільтра в системі Simulink,

б) схема моделювання

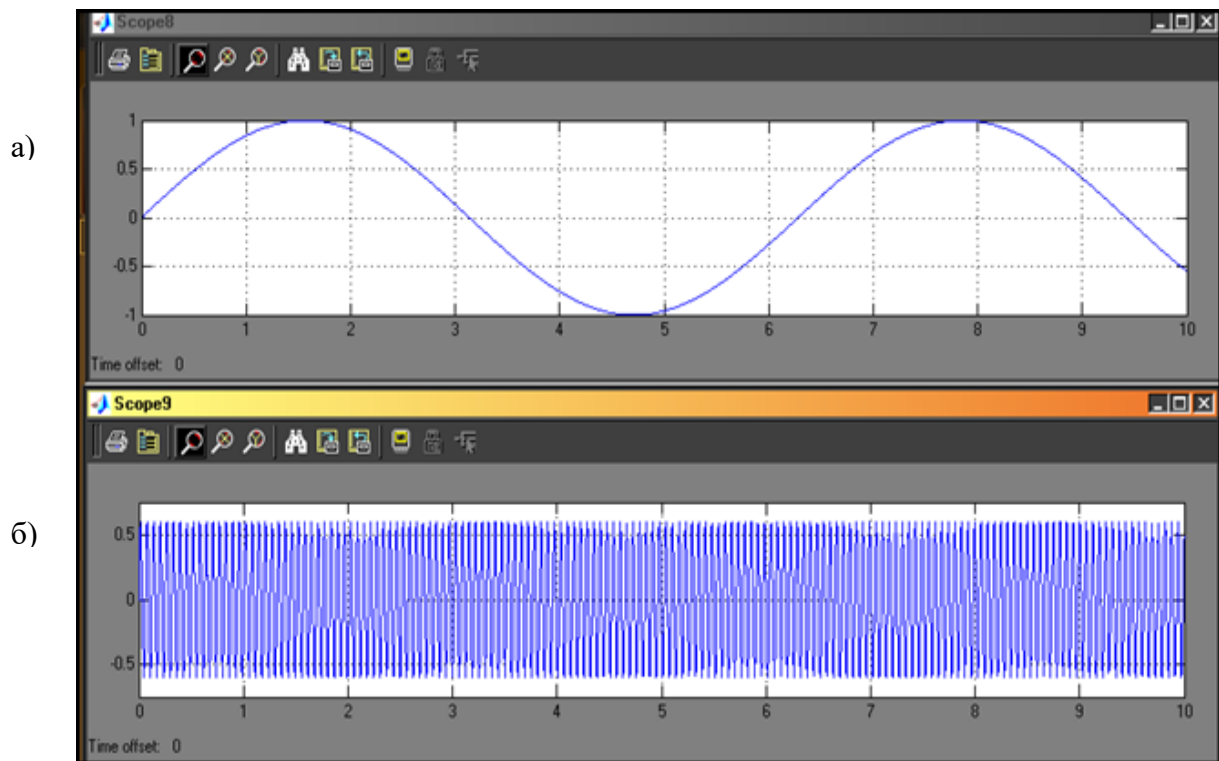


Рис.6.13. Сигнали на вході адаптивного фільтру:
а) вхідний корисний сигнал $S(t) = 1 \sin 1t$;
б) завада $\xi(t) = 0.6 \sin 100t$

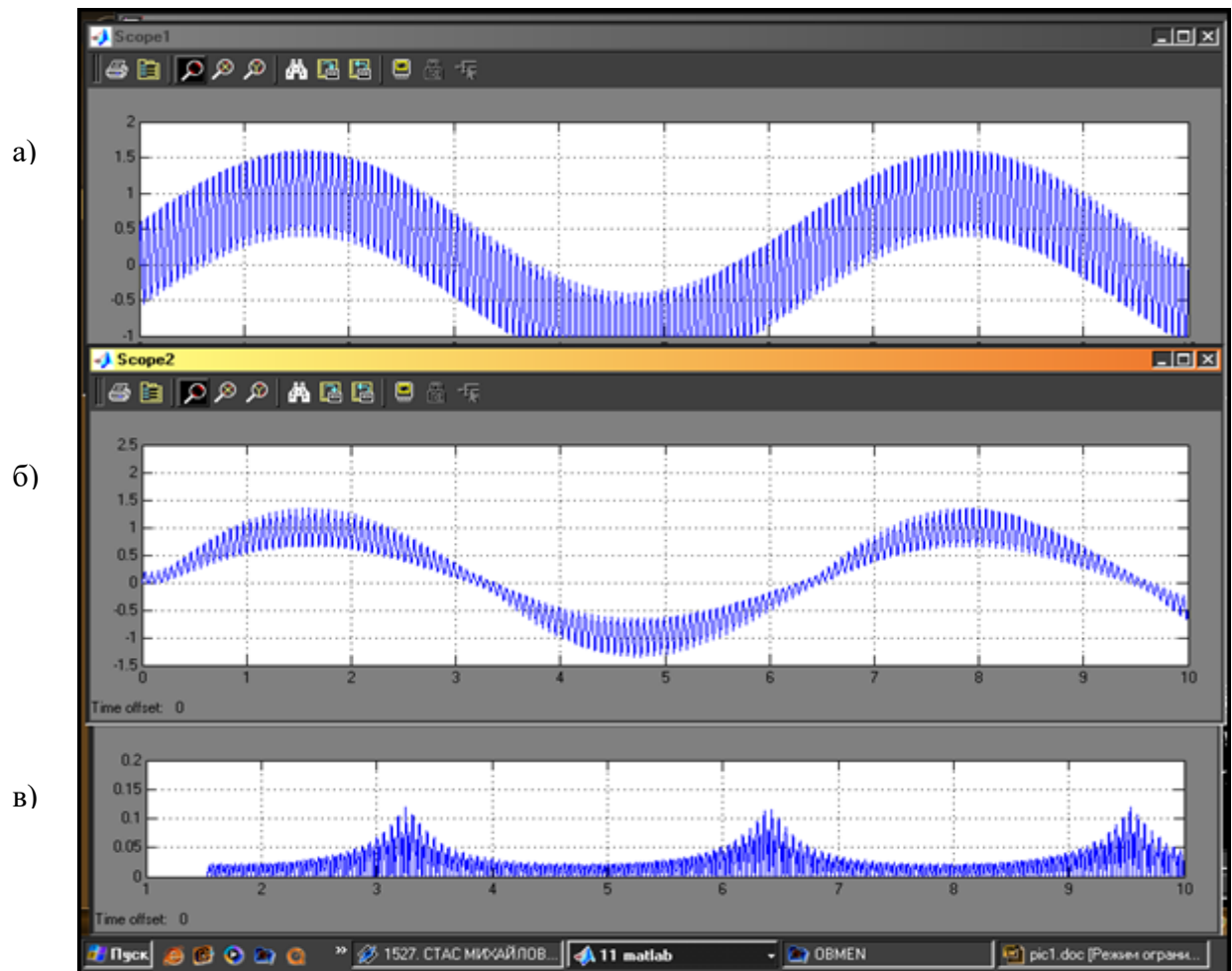


Рис.6.14. Сигнали , які характеризують роботу адаптивного фільтру:
 а) вхідний сигнал $U(t) = S(t) + \xi(t) = 1 \sin 1t + 0.6 \sin 100t$;
 б) вихідний сигнал фільтру; в) стала часу T_ϕ ; $\omega_{comp} = 20$ рад/с – смуга пропускання

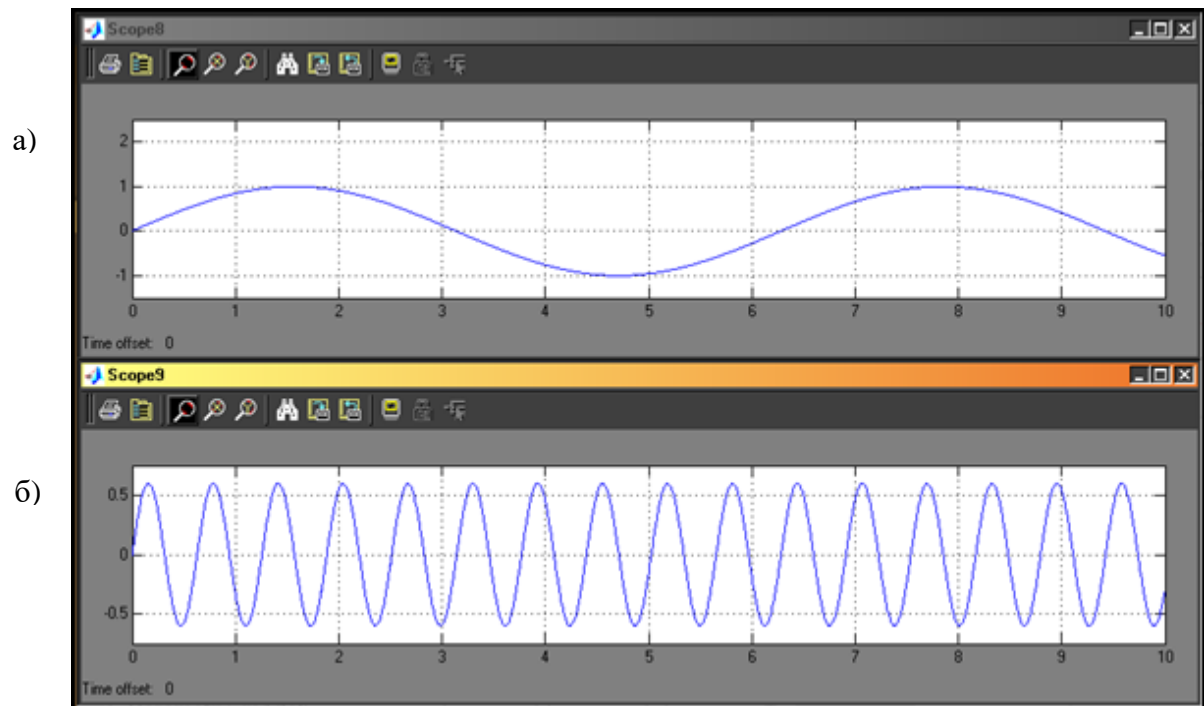


Рис.6.15. Сигнали на вході адаптивного фільтру:

а) вхідний корисний сигнал $S(t) = 1 \sin 1t$;

б) завада $\xi(t) = 0.6 \sin 10t$

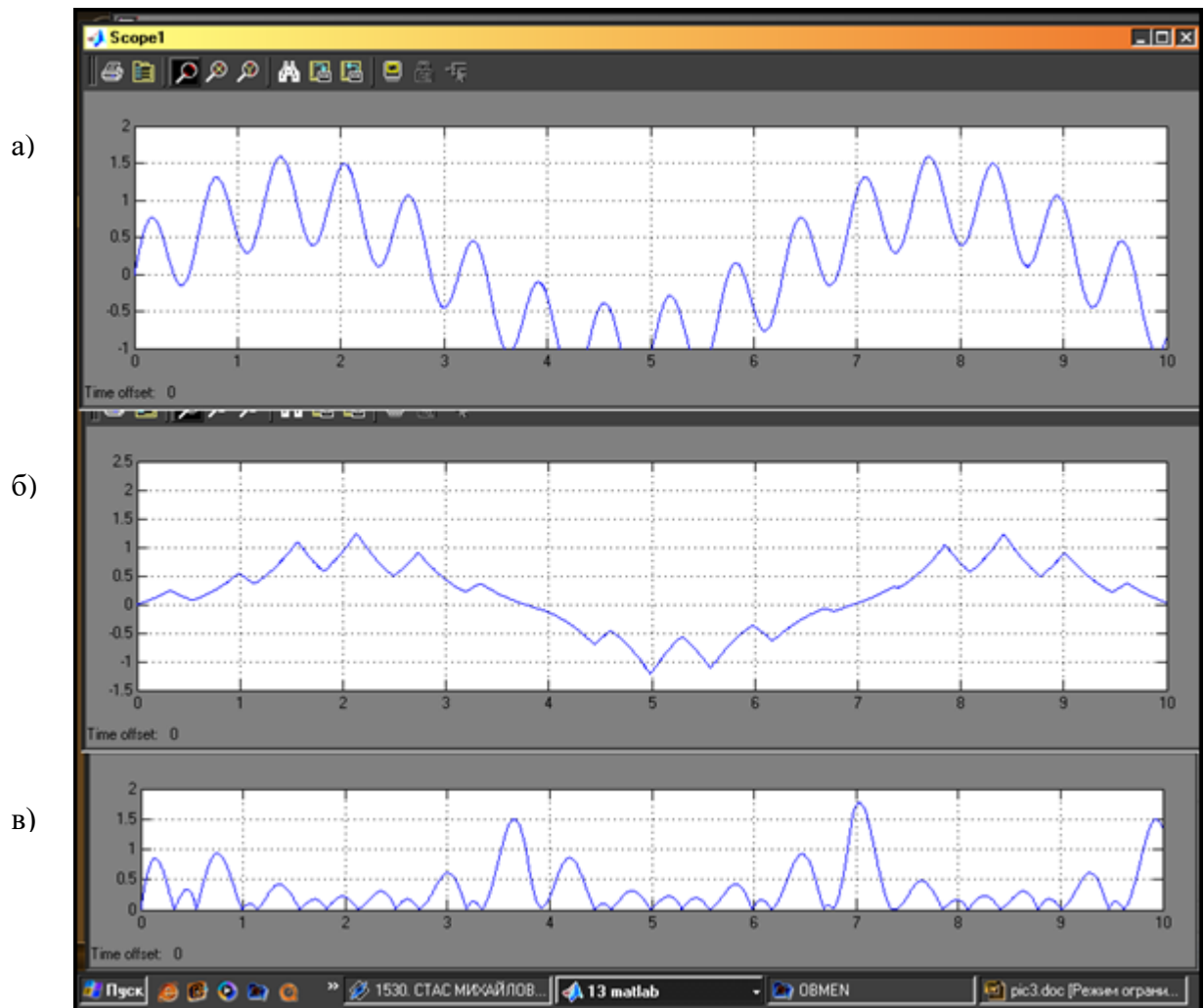


Рис.6.16. Сигнали , які характеризують роботу адаптивного фільтру:
 а) вхідний сигнал $U(t) = S(t) + \xi(t) = 1 \sin 1t + 0.6 \sin 10t$;
 б) вихідний сигнал фільтру; в) стала часу T_{ϕ} ; $\omega_{conp} = 2$ рад/с – смуга пропусення

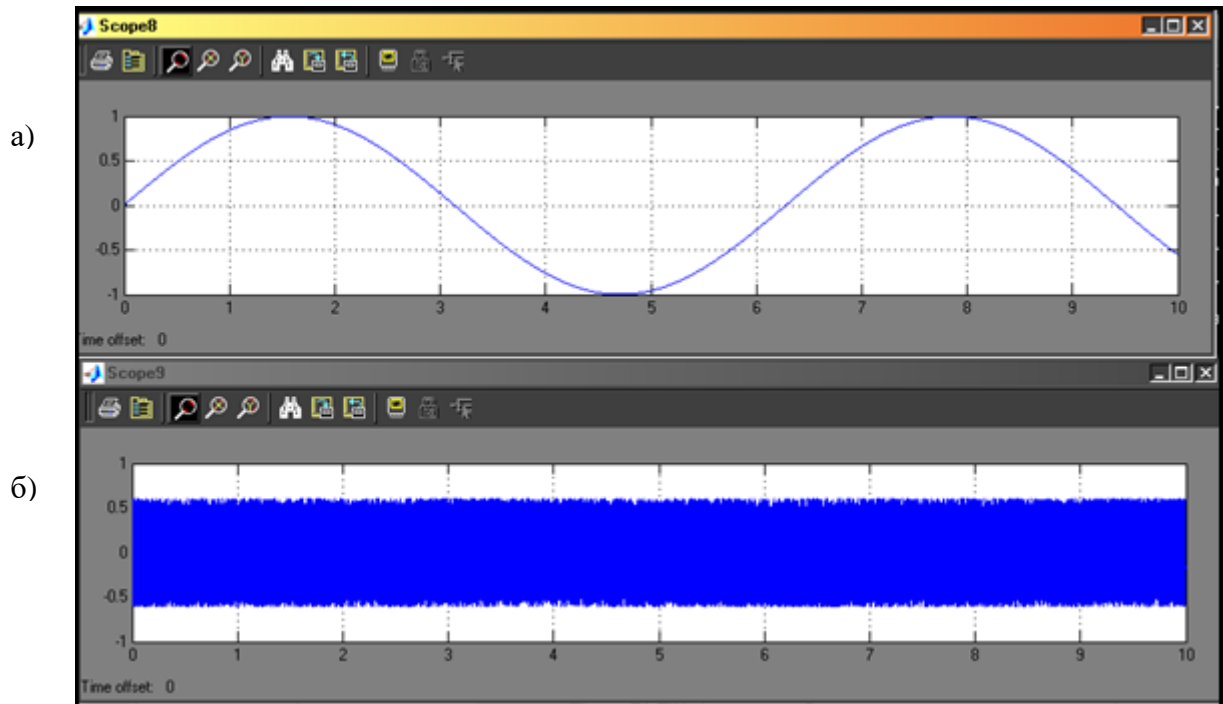


Рис.6.17. Сигнали на вході адаптивного фільтру:
а) вхідний корисний сигнал $S(t) = 1 \sin 1t$;
б) завада $\xi(t) = 0.6 \sin 1000t$

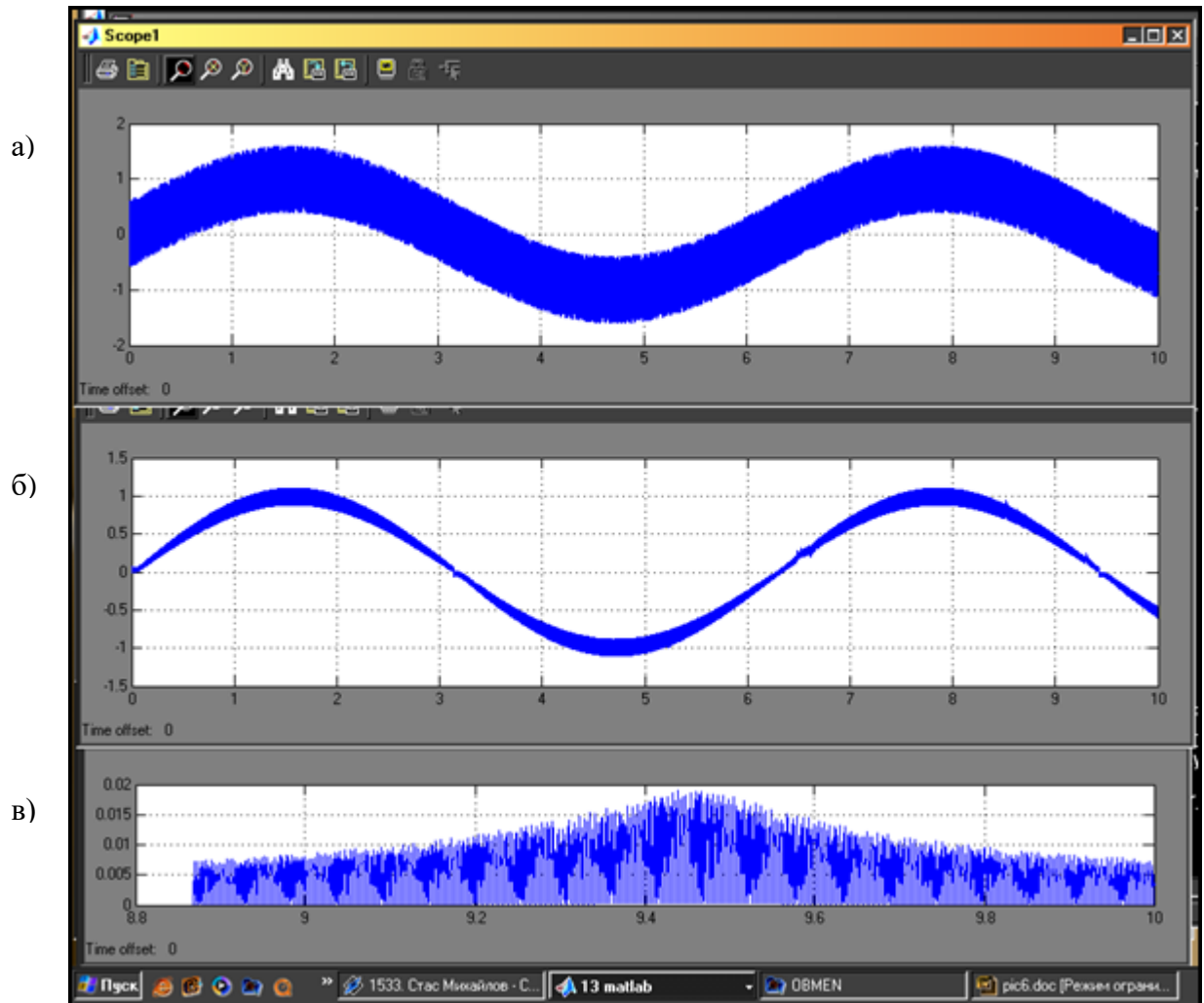


Рис.6.18. Сигнали , які характеризують роботу адаптивного фільтру:
 а) вхідний сигнал $U(t) = S(t) + \xi(t) = 1 \sin 1t + 0.6 \sin 1000t$;
 б) вихідний сигнал фільтру; в) стала часу T_ϕ ; $\omega_{comp} = 20$ рад/с – смуга пропускання

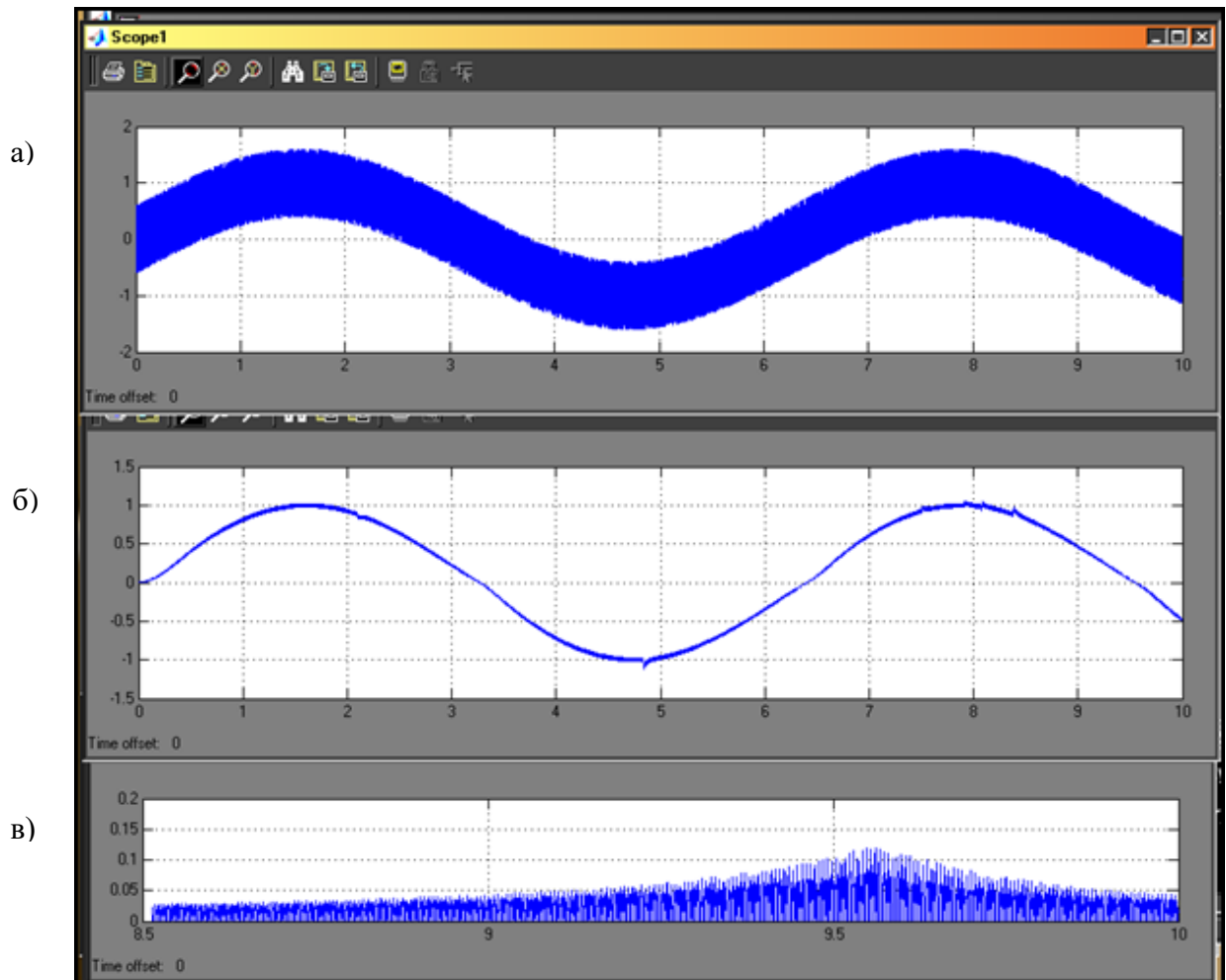


Рис.6.19. Сигнали , які характеризують роботу адаптивного фільтру:
 а) вхідний сигнал $U(t) = S(t) + \xi(t) = 1 \sin 1t + 0.6 \sin 10t$;
 б) вихідний сигнал фільтру; в) стала часу T_{ϕ} ; $\omega_{comp} = 100$ рад/с – смуга пропускання

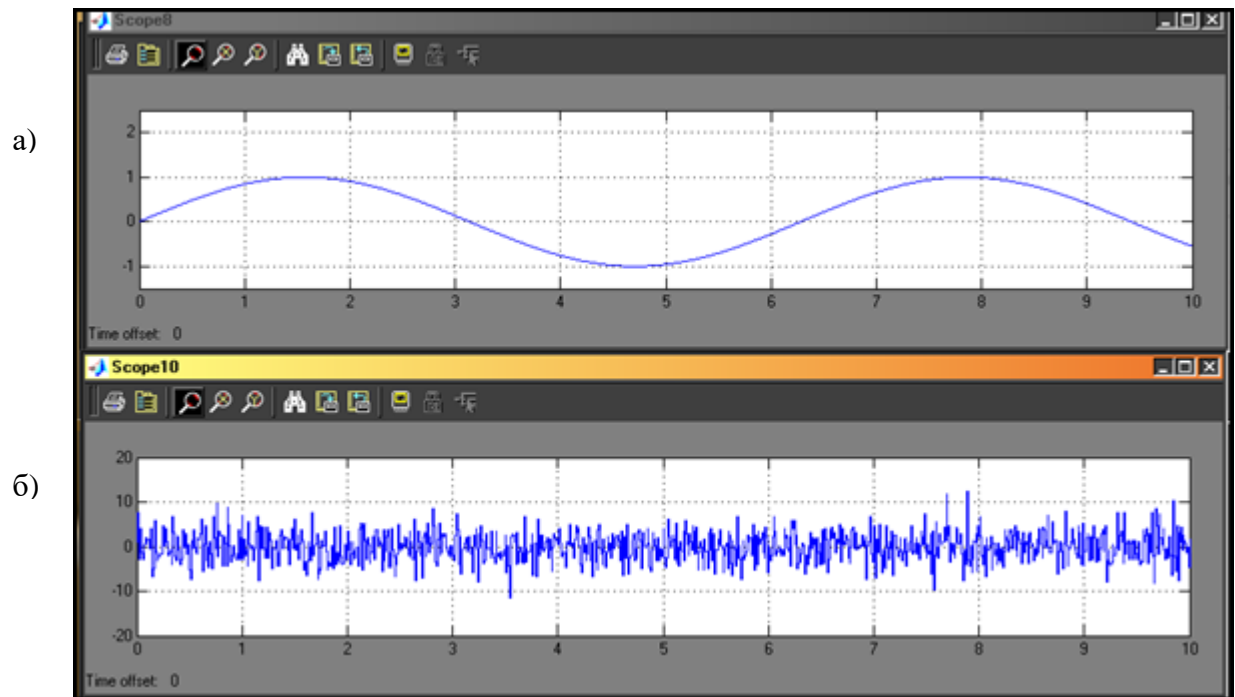


Рис.6.20. Сигнали на вході адаптивного фільтру:
а) вхідний корисний сигнал $S(t) = 1 \sin 1t$; б) завада (кількість
видаваних випадкових чисел- 23341, період надання чисел 0,01 с,
енергія 0,1)

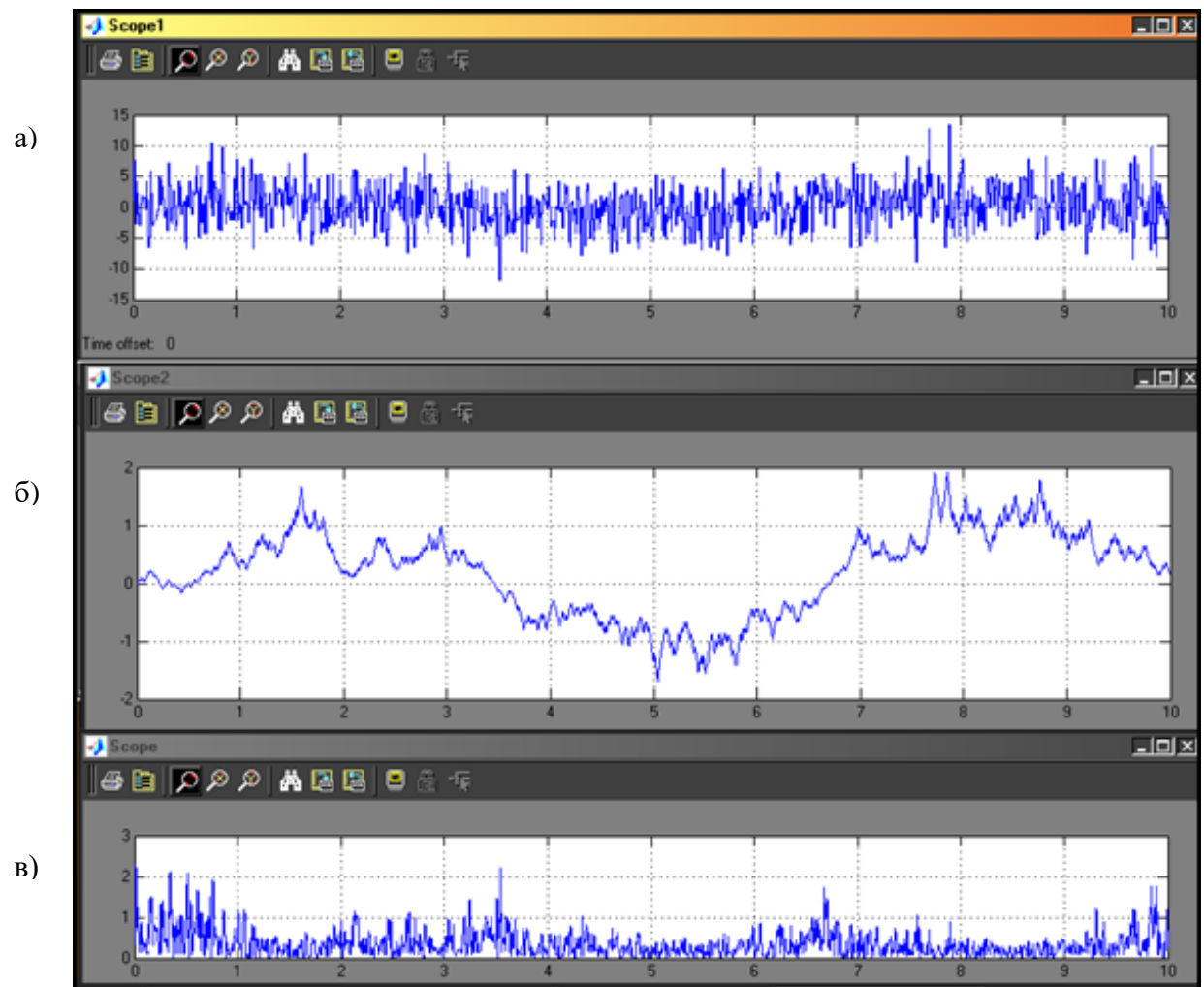


Рис.6.21. Сигнали , які характеризують роботу адаптивного фільтру:
 а) суміш корисного сигналу $S(t) = 1 \sin 1t$ й випадкової завади $\xi(t)$
 - відповідає рис. 6.20, б) вихідний сигнал фільтру; в) стала часу T_ϕ ;
 $\omega_{conp} = 10$ рад/с – смуга пропускання

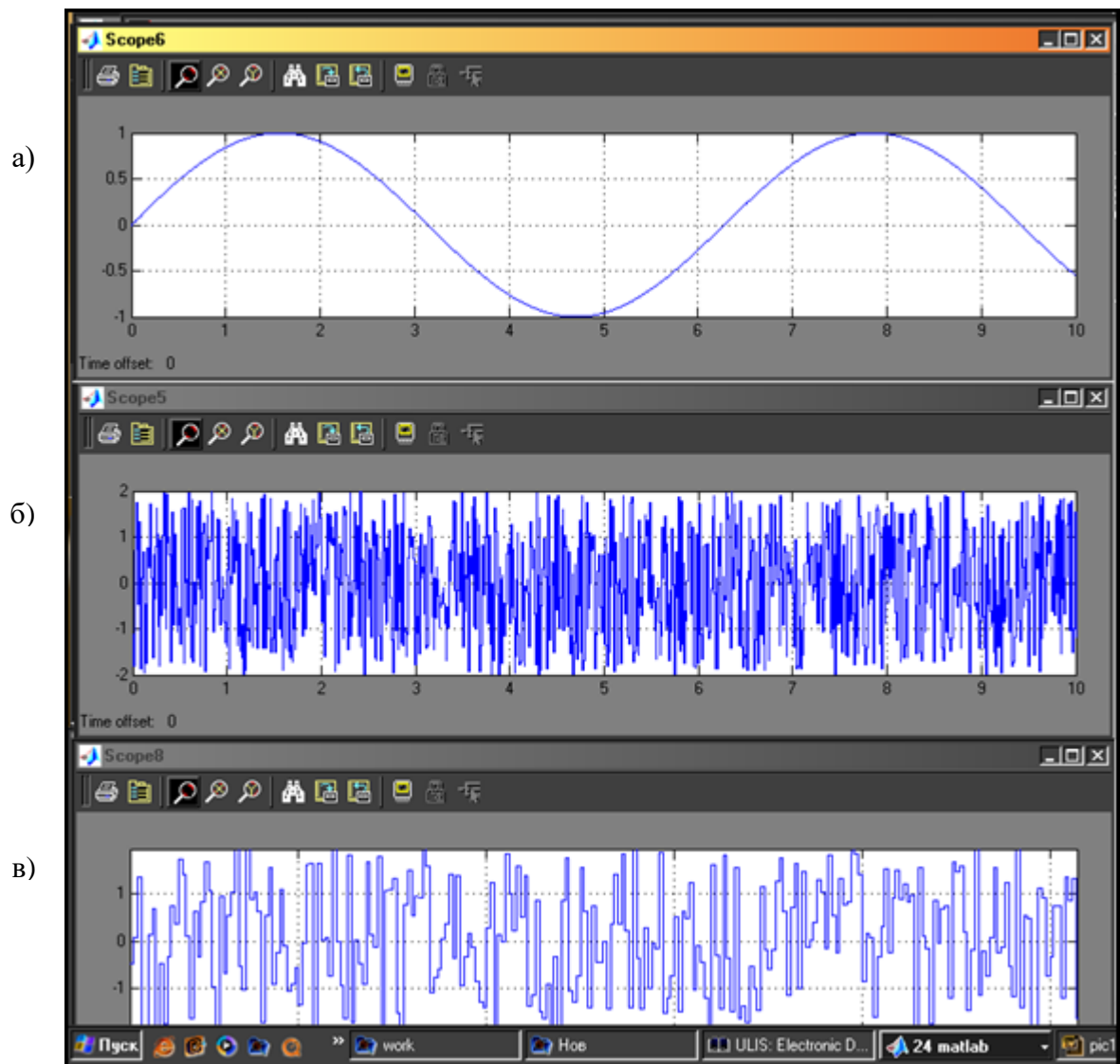


Рис.6.22. Сигнали , які характеризують роботу адаптивного фільтру:
 вхідні сигнали:
 а) корисний $S(t) = 1 \sin 1t$; б) завада у вигляді послідовності випадкових чисел з амплітудою від мінус 2 до плюс 2 В, період генерації чисел 0.01с, початкове число – 0. в) завада у укрупненому вигляді

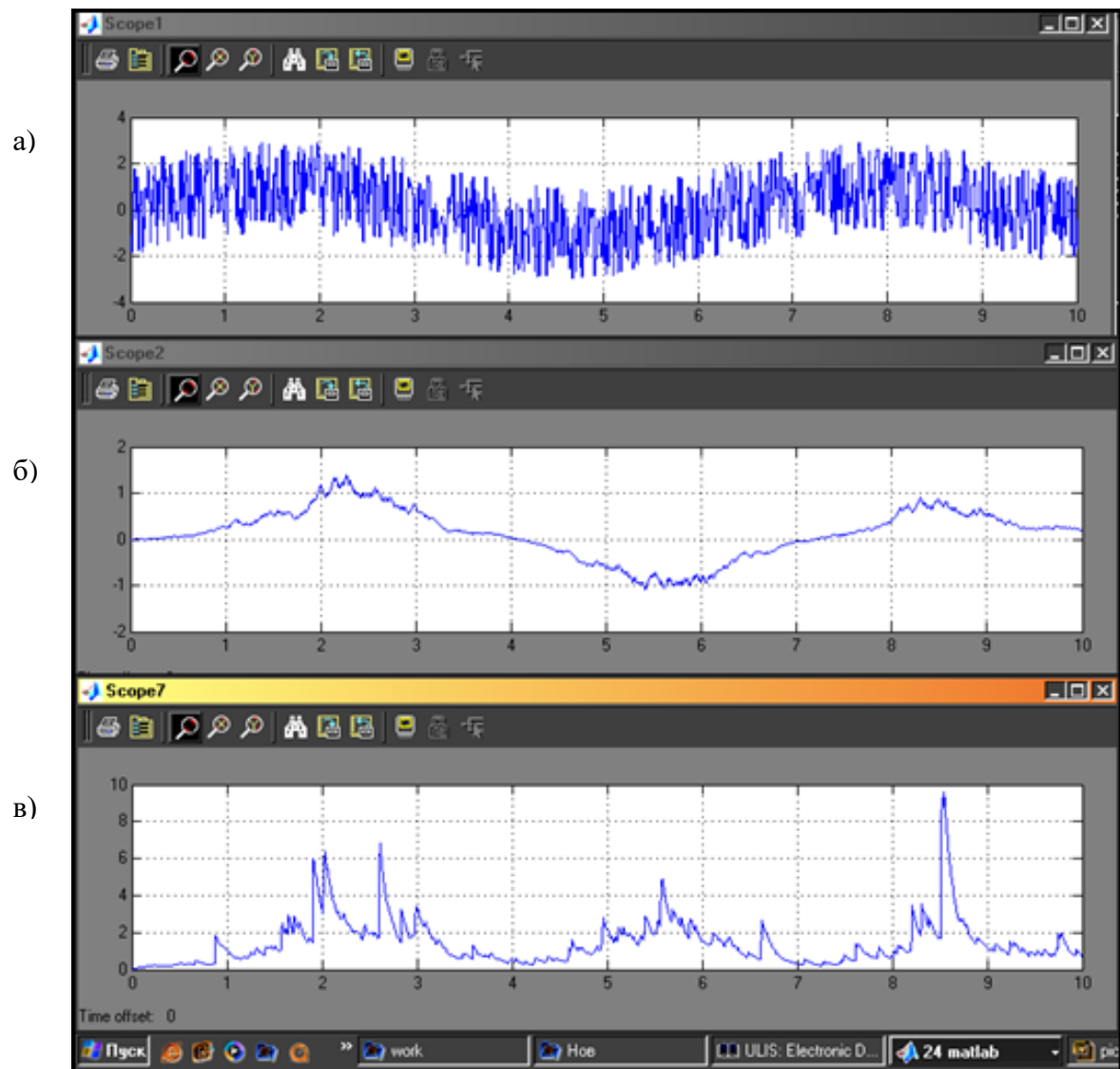


Рис.6.23. Сигнали , які характеризують роботу адаптивного фільтру:
 а) вхідний сигнал $U(t) = S(t) + \xi(t)$; б) вихідний сигнал фільтру;
 в) стала часу T_{ϕ} ; $\omega_{conp} = 50$ рад/с – смуга пропускання

Висновки

1. Досліджено основні фактори, що впливають на функціонування рейкових кіл з мікропроцесорними колійними приймачами. Електричні рухомі одиниці, а також ряд зовнішніх факторів викликають появу завад змінної інтенсивності, які необхідно враховувати при синтезі контурів керування. Показано, що завади знаходяться у більш високочастотній області ніж корисні сигнали. Рознесення цих частот складає більше 5 разів.
2. Для зменшення впливу завад із змінними характеристиками на КК і зменшення смуги пропущення корисного сигналу при наявності завади запропоновано введення до складу контурів керування адаптивних фільтрів, які враховують оцінку поточного відношення сигнал/завада.
3. Розроблено метод адаптивної фільтрації сигналів на основі визначення поточних оцінок рівнів R сигналів та Q завад, який на відміну від класичних методів фільтрації не потребує накопичення інформації про статистичні характеристики сигналів та завад. На основі поточного обчислення відношення сигнал/завада цей метод дозволяє неперервно обчислювати сталу часу при цьому забезпечується динамічний режим адаптації сталої часу.
4. Розроблено критерій оптимізації, який враховує інформацію про сигнал та завади у вигляді функціоналу, який характеризує перевищення оцінкою потужності вихідного сигналу фільтру $|y^3(t)|$ потужності складової вихідного сигналу, викликаной завадою. Введення у функціонал складової $|y^3(t)|$ дозволяє у процесі оптимізації до 100 разів збільшити оптимальну сталу часу фільтру у разі виникнення завади. При цьому при синтезі параметрів фільтру на основі диференціювання функціоналу враховуються реальні

енергетичні параметри сигналів. Синтезованому адаптивному фільтру відповідає екстремум запропанованого функціоналу.

5. Перевагами розробленого методу адаптивної фільтрації є: виключення встановлення великої кількості випадковим чином задаваних початкових значень коефіцієнтів настроювання фільтру, що збільшує швидкодію динамічної адаптації сталої часу фільтру; наявність додаткового спеціального параметричного вихідного сигналу, який використовується для настроювання параметрів адаптивного контуру керування; при синтезі фільтру на основі цього методу підвищується коефіцієнт приглушення завад до 40 дБ у діапазоні зміни сталої часу фільтру 0.01 – 10 с.

РОЗДІЛ 7

СИНТЕЗ АДАПТИВНИХ ЗАВАДОЗАХИЩЕНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

РО рейкового транспорту є складними й широко використовуваними об'єктами, що функціонують в умовах впливу завад змінної інтенсивності. Тому КК для керування такими об'єктами повинні відрізнятися простотою реалізації та високими динамічними характеристиками.

7.1. РО як об'єкти з розподіленими параметрами

Багато механічних, транспортних об'єктів з розподіленими параметрами (ОРП), РО рейкового транспорту, а також інші об'єкти можуть бути описані лінійними системами диференціальних рівнянь у частинних похідних [76, 119]. Параметри таких об'єктів змінюються у часі, наприклад, довжина поїзда, розподіл маси поїзда за його довжиною та ін. Відомо, що в таких об'єктах за певних умов можливий параметричний резонанс. На відміну від звичайного резонансу змущених коливань, що виникає в результаті збігу частоти зовнішнього адитивного збурювання із власною частотою коливань механічної системи, при параметричному резонансі коливання звичайно зростають у часі за експонентним законом й у меншому ступені демпфіруються силами тертя, що робить їх особливо небезпечними в тих прикладних завданнях, у яких бажано уникати резонансних явищ. Ці й інші завдання привели до створення загальної математичної теорії лінійних періодичних гамільтонових систем [76, 119-122]. В.А. Лазаряном [76] [проведене теоретичне дослідження перехідних процесів руху поїздів, складних механічних транспортних об'єктів без врахування керуючої системи, яке підкріплено експериментальними дослідженнями на реальних поїздах і постановкою лабораторних експериментів на електронних моделях поїзда. Ним створена теорія стійкості руху рейкових транспортних засобів.

Визначення зусиль, що виникають у розподілених РО при перехідних режимах руху, важливе для проектування ефективних КК. До перехідних режимів відносяться пуск і гальмування поїздів, рух через переломи поздовжнього профілю колії, рух при зміні сили тяги й ін. У цих режимах у зв'язку зі зростанням швидкостей руху РО необхідно враховувати зусилля, які виникають між вагонами, обмеження на їх максимальні (за модулем) значення, на високу швидкість протікання перехідних процесів. Ручне керування тут неприйнятно через обмежені психофізіологічні реакції машиністів, тому що на оцінку ситуацій й ухвалення рішення щодо вироблення нових керувань потрібен час, менший за 10 мс. У випадку неоднорідних поїздів, складених із різнотипних та різним чином навантажених вагонів, запропоновано механічну модель [76] у вигляді системи стрижнів (твердих тіл), з'єднаних між собою пружними елементами (наприклад, пружинами) з навантаженням на одному або на двох кінцях (тягнучі або штовхальні локомотиви). Тобто поїзд необхідно розглядати як об'єкт із розподіленими в часі й просторі параметрами (ОРП). Для дослідження динаміки таких об'єктів Н.Е. Жуковським і В.А. Лазаряном запропоновано використати диференціальні рівняння вигляду

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} - a^2 \left[1 + \mu \frac{\partial}{\partial \tau} \right] \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = f(x, \tau), \quad (7.1)$$

де (у позначеннях [76, 201]) x – поздовжня лагранжева координата довжини РО; μ – коефіцієнт в'язкості матеріалу; ρ – маса одиниці довжини; u – поздовжнє переміщення перетину стрижнів ОРП (вагонів) уздовж координати x ; τ – тривалість процесу; $a = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$ – швидкість поширення пружної хвилі уздовж РО, k – жорсткість; $f(x, \tau)$ – зовнішні збурюючі впливи з відповідними граничними і початковими умовами.

Якщо в (7.1) позначити поздовжню швидкість переміщення перетину стрижнів (вагонів) уздовж координати x як $v = \frac{\partial u}{\partial \tau}$, то відповідно до робіт [76, 120, 202] поведження такої РО в перехідних режимах (рух групи РО по

рейках, поздовжні й поперечні коливання мас РО, що виникають при їхньому русі), може бути описане в безрозмірній формі одно– або двовимірним рівнянням масопередачі типу Фур'є

$$ds_1 \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right] = ds_1 c \rho \frac{\partial V}{\partial \tau}, \quad (7.2)$$

де s_1 – площа; x, y – поздовжня й поперечна координати довжини; λ – коефіцієнт масопровідності матеріалу; $c\rho$ – об'ємна масоємність; V – керована величина (швидкість руху маси в точці x РО); τ – тривалість процесу.

У [76] досліджувалося тільки автономне поводження ОРП як об'єкта керування в перехідних режимах. Важливі питання синтезу ефективного керування для РО в замкнутому контурі при впливі завад різної інтенсивності не розглядалися. У ряді робіт синтез керування таким об'єктом зведений до синтезу регуляторів для окремих підсистем керування поїздом [111-116]. При цьому використані моделі РО із зосередженими параметрами (наприклад, керування енергетичною установкою тепловозів, тяговими двигунами, генераторами власних потреб та ін.). Тому подальше розроблення швидкодіючих завадозахищених КК для РО з урахуванням розподіленої маси й наявності хвилеподібних процесів при поширенні зусиль та сигналів за довжиною РО є важливою проблемою.

7.2. Двопровідна електрична лінія з розподіленими параметрами як модель РО

Електричною моделлю РО [76, 201] може служити довга двопровідна електрична лінія з розподіленими параметрами. Елемент довгої двопровідної електричної лінії з розподіленими параметрами наведений на рис. 7.1.

Якщо електрична лінія настільки довга, що її параметри (опір і т.д.) не можуть розглядатися зосередженими в окремих точках, то в такій лінії напруга e і струм i залежать не тільки від часу t , але й від координати x уздовж лінії.

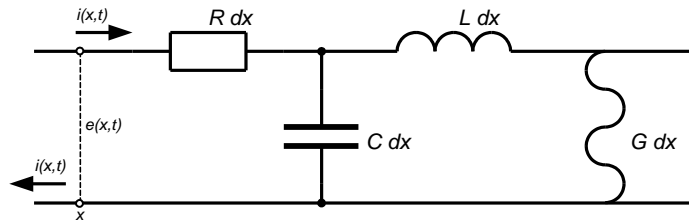


Рис. 7.1. Елемент двопровідної електричної лінії з розподіленими параметрами: R – опір, L – індуктивність, C – ємність, G – витік з одного проводу в інший (ці величини віднесені до одиниці довжини)

Отже, e й i є функціями координати й часу $e(x,t)$, $i(x,t)$. Лінія складається із двох паралельних проводів, тому струми $i(x,t)$ у точках обох проводів з однакою координатою x рівні за величиною, але спрямовані в протилежні боки. Функція $e(x,t)$ визначає різницю потенціалів між проводами в точці

Для моделі, яка розглядається, має місце така система рівнянь у частинних похідних першого порядку:

$$\begin{cases} \frac{\partial e}{\partial x} + L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri = 0, \\ \frac{\partial i}{\partial x} + C \frac{\partial e}{\partial t} + Ge = 0. \end{cases} \quad (7.3)$$

Для того, щоб привести цю систему до одного рівняння в частинних похідних другого порядку для функції $e(x, t)$, перепишемо рівняння в (7.3) у такий спосіб

$$\begin{aligned} -\frac{\partial e}{\partial x} &= \left(L \frac{\partial}{\partial t} + R \right) i, \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= \left(C \frac{\partial}{\partial t} + G \right) e. \end{aligned} \quad (7.4)$$

Продиференціювавши перше рівняння (7.4) по x , одержимо

$$-\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = \left(L \frac{\partial}{\partial t} + R \right) \frac{\partial i}{\partial x}.$$

Підставивши сюди $\frac{\partial i}{\partial x}$ із другого рівняння (7.4), одержимо так називане телеграфне рівняння:

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = \left(L \frac{\partial}{\partial t} + R \right) \left(C \frac{\partial}{\partial t} + G \right) e,$$

яке можна подати в такому вигляді:

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 e}{\partial t^2} + (LG + RC) \frac{\partial e}{\partial t} + RGe. \quad (7.5)$$

Аналогічне рівняння можна одержати й для струму $i(x,t)$. При $R=G=0$ телеграфне рівняння (7.5) перетвориться у хвильове рівняння Даламбера,

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 e}{\partial t^2}, \quad (7.6)$$

розв'язання якого має такий вигляд

$$e_m = A e^{-j\omega x} + B e^{j\omega x}, \quad (7.7)$$

де A й B визначаються початковими умовами.

Рівняння (7.7) описує хвилю, що рухається у бік як зростання координати, так й у бік убутання по довгій лінії. При $B=0$ довга лінія перетвориться в ланку із запізнюванням, у якій хвиля поширюється тільки у бік зростання координати x . Частотна передатна функція цієї ланки така

$$W(j\omega) = e^{-j\omega\tau}, \quad (7.8)$$

де $\tau = ax$ – час чистого запізнювання.

При $L=G=0$ телеграфне рівняння переходить у рівняння масо-провідності Фур'є або рівняння кабелю Томпсона, що може характеризувати швидкість поширення сигналу в рейкових колах залізниць, довгих електричних RC – ланцюгах і механічних системах (наприклад, поїздах)

$$\frac{\partial^2 e}{\partial x^2} = RC \frac{\partial e}{\partial t}. \quad (7.9)$$

Рівняння (7.9) описує так звані ланки затухання (або півзапізнювання, півінерційні, півінтегральні й т.п.). При цьому передатні функції моделей таких ланок можуть містити оператори вигляду [199, 200]:

$$\begin{aligned} W(x,s) &= \exp(-x\sqrt{s}), \quad W(x,s) = (x\sqrt{s})^{-1}; \\ W(x,s) &= \left(1 + \frac{x}{n}\sqrt{s}\right)^n, \quad W(x,s) = (1+x\sqrt{s})^{-n}; \quad W(x,s) = k\sqrt{s} \end{aligned} \quad (7.10)$$

і інші, де s – оператор Лапласа, x – координата (для одновимірного випадку) вузлової координати моделі об'єкта. В [199, 200] розглядаються питання стійкості КК із подібними об'єктами. Про динаміку замкнутого КК із передатною функцією вигляду

$$W(q) = \sum_{i=1}^{2n+1} \text{Res}A(q_i)(q-q_i) = \frac{A(q^2)}{B(q)}, \text{ де } q = \sqrt{s}, \quad (7.11)$$

в якому використано регулятор та РО з розподіленими параметрами, можна судити за його реакцією на одиничний вхідний сигнал, причому по кожній зі складових окремо.

У [199, 200] показано, що для стійкості такого КК $2n+1$ коренів фіктивного характеристичного рівняння $B(q)=0$ повинні лежати поза областю комплексної площини ($\text{Im}q, \text{Re}q$), обмеженої бісектрисами першого й четвертого квадрантів. Умова знаходження дійсної частини коренів ліворуч від уявної осі підсилює стійкість системи. Для кожного дійсного негативного кореня $q_i = -\alpha_i$ складова перехідного процесу $h_i(t)$ виражається функцією вигляду [200]

$$h_i(t) = A_i(q) [1 - \exp(-q_i^2 t) \varphi(-q_i \sqrt{t})], \quad (7.12)$$

У [199] обґрунтоване застосування пропорційно–інтегральних регуляторів при керуванні інерційними об'єктами на підставі розв'язання варіаційного завдання мінімізації функціонала

$$F(t) = \int_0^\infty [u^2(t) + \dot{u}^2(t) + \varepsilon^2(t)] dt, \quad (7.13)$$

де $\varepsilon(t)$ – помилка регулювання; $u(t), \dot{u}(t)$ – керування і його перша похідна.

Таким чином, якщо керована РО описується передатною функцією, яка має у своєму складі ірраціональні ланки вигляду (7.10), то оптимізувати перехідний процес у замкнутому КК буде регулятор, що має у своїй структурі пропорційні, півдиференціальні, півінтегральні, півінерційні й інші ірраціональні ланки.

Отже, можна припустити (при $q = \sqrt{s}$), що якщо об'єкт описується, наприклад, півінерційною ланкою, то оптимізувати процес у замкнутій системі буде пропорційно–півінтегральний регулятор

$$W(q) = K_n + \frac{K_u}{q}. \quad (7.14)$$

Обґрунтування адекватності

Розглянемо об'єкт із передатною функцією $W_{01}(x, s)$, що складається з послідовно з'єднаних півінерційної ланки з передатною функцією (7.10) і аперіодичної ланки

$$W_{01}(x, s) = \frac{k_0(x)e^{-x\sqrt{s}}}{b_0(x)s+1}, \quad (7.15)$$

і об'єкт із передатною функцією $W_{02}(x, s)$, яка складається з послідовно з'єднаних ланки із чистим запізнюванням та аналогічної аперіодичної ланку

$$W_{02}(x, s) = \frac{k_0(x)e^{-\tau(x,s)s}}{b_0(x)s+1}. \quad (7.16)$$

Умова рівності передатних функцій $W_{01}(s) = W_{02}(s)$ [195] виконується, якщо

$$\tau(x, s) = \frac{x}{\sqrt{s}}. \quad (7.17)$$

Оригінал виразу (7.17), відповідно до [199], визначається формулою

$$\tau(x, t) = \frac{x}{\sqrt{\pi t}}. \quad (7.18)$$

У загальному випадку елемент чистого запізнювання можна подати у вигляді механічного транспортера або магнітної стрічки магнітофона (рис. 7.2). Однак така модель РО для поїзда не відбиває реальні процеси в поїзді, тому що запізнювання усередині поїзда, яке необхідно враховувати, залежить не тільки від точки (координати), що визначає процес формування й передачі сигналів керування, але й від часу, відповідно до (7.18). Крім того, модель поїзда у вигляді стрічки транспортера є абсолютно жорсткою. Реально поїзд складається з послідовно з'єднаних жорстких вагонів і пружних елементів (наприклад, зчіпок між ними). Тому модель поїзда повинна відбивати з'єднання між сусідніми РО й поширення механічних хвиль сигналів в обидва кінці поїзда.

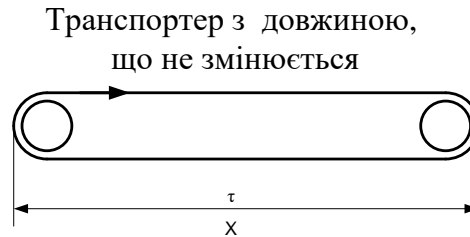


Рис. 7.2. Механічний транспортер як модель об'єкта із запізнюванням

Таким чином, величина чистого запізнювання в (7.18) є змінною функцією часу t і просторової координати x ОРП.

Для визначення величини еквівалентного запізнювання розглянемо відповідне (7.16) диференціальне рівняння об'єкта

$$\sum_{i=1}^n b_i(x) V^{(i-1)}(x, t) + V^{(n)}(x, t) = K_0(x) \varphi_0[t - \tau(x, t)]. \quad (7.19)$$

$\tau \in (0, t)$ визначається нерівністю у відповідності до (7.18) та (7.19)

$$t \geq \tau(x, t) = \frac{x}{\sqrt{\pi t}}. \quad (7.20)$$

Для визначення величини запізнювання в (7.19) побудуємо графік з координатами $y_1(t) = t$ та $\tau(x, t) = \frac{x}{\sqrt{\pi t}}$, наведений на рис. 7.3. У табл. 7.1 наведені дані розрахунків $\tau(x, t)$. На графіках функції координати об'єкта $x \in (0, 1)$ й тривалості процесу $t \in (0, 1)$ є безрозмірними.

У табл. 7.2 наведене значення еквівалентного запізнювання $\tau(x)$ об'єкта, визначеного із графіка на рис. 7.3 відповідно до (7.20) за формулою

$$\tau(x) = [\tau(x, t)^2 t]^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}. \quad (7.21)$$

З аналізу даних табл. 7.1 витікає:

1. Величина запізнювання об'єкта, описуваного одновимірним безрозмірним рівнянням нестационарної масопередачі типу Фур'є, при відносній зміні координати x на 10 % змінюється до 11 %.

2. У середині ОРП при зміні x від 0.4 до 0.5 запізнювання $\tau(x)$ змінюється на 11,3 %.

3. Величина $\tau(x)$ змінюється в 3.095 разів при зміні x від 0.1 до 1.0.

4. При переході від безрозмірних координат x і часу t до реального об'єкта необхідно скористатися формулами масштабування

$$\tau(x, t) = \frac{t(x')^2}{a} \text{ та } x' = xl.$$

Таблиця 7.1

Визначення динаміки зміни часу запізнювання об'єкта

	$x=0.1$	$x=0.2$	$x=0.3$	$x=0.4$	$x=0.5$	$x=0.6$	$x=0.7$	$x=0.8$	$x=0.9$	
$\tau(x, t)$	0.179	0.357	0.536	0.719	0.893	1.07	1.25	1.43	1.605	$t=0.1$
	0.126	0.252	0.379	0.505	0.631	0.77	0.88	1.00	1.14	$t=0.2$
	0.103	0.206	0.309	0.412	0.515	0.618	0.721	0.824	0.93	$t=0.3$
	0.089	0.178	0.268	0.36	0.45	0.54	0.624	0.714	0.8	$t=0.4$
	0.08	0.158	0.239	0.32	0.4	0.48	0.56	0.64	0.72	$t=0.5$
	0.073	0.145	0.218	0.29	0.36	0.44	0.51	0.58	0.65	$t=0.6$
	0.068	0.135	0.203	0.27	0.34	0.41	0.47	0.54	0.61	$t=0.7$
	0.063	0.126	0.189	0.25	0.32	0.38	0.44	0.51	0.57	$t=0.8$
	0.06	0.119	0.176	0.238	0.298	0.36	0.416	0.48	0.54	$t=0.9$

Таблиця 7.2

Залежність величини еквівалентного запізнювання $\tau = \tau(x, t)$ об'єкта від координати x

	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
τ	0.233	0.306	0.371	0.430	0.4858	0.5384	0.5885	0.6366	0.6829	0.7277

У загальному випадку моделі поїзда можуть бути подані механічними транспортерами двох видів (рис.7.2, 7.4):

- з довжиною, що змінюється за законом (7.18) залежно від координати x і часу запізнювання $\tau(x, t)$ (верхній транспортер, рис.7.4);
- з постійною довжиною, що відповідає постійному еквівалентному запізнюванню $\tau(x)$ (нижній транспортер, рис.7.2, 7.4).

Розрахунки показують, що модель із еквівалентним запізнюванням відрізняється від моделей В.А. Лазаряна у часткових похідних (іраціональна передатна функція) не більше ніж на 10%.

Таким чином, модель РО, описувану рівняннями в частинних похідних, можна замінити звичайним диференціальним рівнянням з еквівалентним постійним (для даної координати x) запізнюванням. Це дозволить, з одного боку, спростити математичні моделі РО (замінити сіткову модель великої розмірності одним рівнянням), а з іншого – застосувати для синтезу регуляторів для ОРП аналітичні методи [71, 91-93, 195, 203-205], розроблені для об'єктів із сталим часом запізнювання.

Залежності зміни довжини верхнього транспортера в часі відповідають даним графіка рис. 7.3. Таким чином, змінний час запізнювання ОРП моделюється зменшенням довжини верхнього транспортера. При цьому кутові швидкості обертання обох транспортерів однакові. У момент часу, обумовлений (7.21), змінне запізнювання верхнього транспортера дорівнює постійному еквівалентному запізнюванню нижнього.

7.3. Синтез адаптивного дискретного КК для РО з іраціональною передатною функцією

Для сучасного розвитку теорії й практики автоматичного регулювання характерне інтенсивне розроблення методів адаптивного керування [26, 31, 33, 40, 41, 74, 100, 101, 195, 206, 207].

При побудові адаптивних КК основним завданням є формування процедур вибору параметрів настроювання регуляторів. Нижче будуть розглядатися питання настроювання параметрів залежно від характеристик завад й об'єкта керування (поїзда).

Одним з основних питань при побудові адаптивних систем є створення й вибір методів ідентифікації параметрів об'єктів.

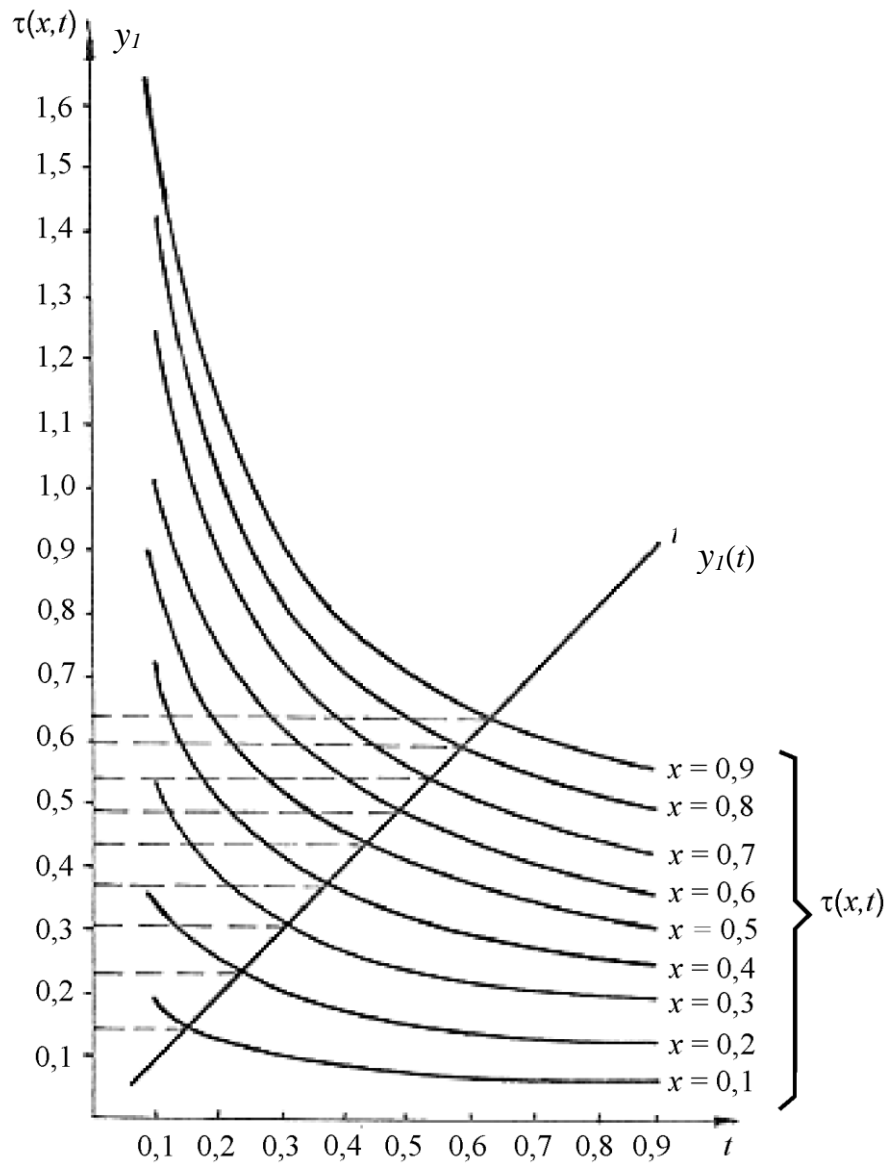


Рис. 7.3. Графік для визначення величини запізнювання об'єкта τ залежно від його координати x і часу t

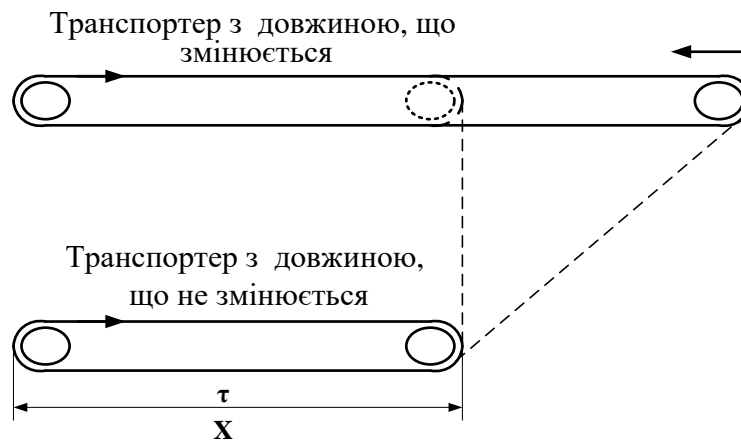


Рис. 7.4. Механічні моделі поїзда у вигляді транспортерів

Відомі різні методи ідентифікації, які використовуються для визначення характеристик об'єктів [34, 208, 209]. Більшість цих методів вимагає накопичення інформації й більших обчислювальних витрат. Наприклад, завдання ідентифікації може бути вирішено шляхом використання моделі, що підключається паралельно об'єкту. Передбачається, що передатні функції об'єкта і моделі, включених паралельно, записуються, наприклад, у вигляді

$$\begin{aligned} W_0(s) &= \frac{1}{a_n \cdot s^n + a_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + a_1 \cdot s + a_0}, \\ W_M(s) &= \frac{1}{a_n \cdot s^n + a_{n-1} \cdot s^{n-1} + \dots + a_1 \cdot s + a_0}. \end{aligned} \quad (7.22)$$

З Використанням методу варіації параметрів моделі проводиться визначення параметрів, при яких сигнал, рівний різниці вихідних сигналів моделі й об'єкта, мінімізується за яким-небудь критерієм якості. Для проведення розрахунків у цьому випадку необхідні громіздкі обчислення (інтегрування, обчислення значень частинних похідних високого порядку й т.п.).

У випадку побудови адаптивних КК для РО ситуація з ідентифікацією спрощується у зв'язку з тим, що вихідні параметри моделі поїзда відомі після його формування, а характеристики колії (радіуси, підйоми, спуски й ін.) зберігаються у відповідній базі даних, що доступна в локомотиві (наприклад, у вигляді техніко-розпорядницьких актів для полігонів залізниць).

Розглянутий метод ідентифікації з моделлю може використовуватися в процесі руху поїзда для накопичення даних, необхідних для підстроювання параметрів регуляторів КК.

У загальному випадку вихідні координати об'єкта спостерігаються на фоні завад, наявність яких приводить до того, що необхідні для побудови КК сигнали оцінюються зі значними помилками. Тому питання про усунення або зменшення впливу завад має важливе практичне значення при вирішенні завдання адаптації. Завдання виділення корисного сигналу, що спостерігається на фоні завад, має велике значення й може бути вирішено за допомогою методів оптимальної фільтрації Вінера-Колмогорова в тому

випадку, якщо характеристики корисного сигналу й завад апріорно відомі. У реальних умовах функціонування КК для РО характеристики корисних сигналів і завад міняються, тому виникає завдання побудови адаптивних фільтрів, які пристосовуються до мінливих умов роботи.

Відомі методи побудови адаптивних фільтрів, розглянуті в розділі 6, що відрізняються високою ефективністю й простотою технічної реалізації. Врахування обмежень, що накладають на корисні сигнали й завади в реальних КК, – спектральні щільності корисного сигналу й завади, рознесені по частоті так, що для завади спектральна щільність розташована в більш високочастотній області в порівнянні з корисним сигналом – дозволяє будувати високоефективні адаптивні фільтри.

У розділі 6 й у роботах [194-196] отримані нові моделі пристроїв адаптивної фільтрації завад, завадозахищеного диференціювання з автоматичною швидкодіючою ідентифікацією поточних значень відношень оцінок випадкових корисних сигналів до завад і великим діапазоном зміни коефіцієнта адаптації.

При побудові КК для РО важливим є питання вибору критерію оптимальності керування. Аналіз методів синтезу систем керування показує, що вибір критерію оптимальності керування не піддається формалізації й залишається суб'єктивним у процесі синтезу.

Часто виникає ситуація, коли необхідно враховувати кілька взаємосуперечливих критеріїв, наприклад, при проектуванні контурів динамічного керування: швидкодія, стійкість, точність, економічність й ін. Вибір залежить від оцінки важливості кожного з використовуваних критеріїв, тобто від присвоєння їм певних вагових показників. При цьому реалізація оптимального керування, що реалізує екстремум більшості використовуваних критеріїв, вимагає застосування методів математичного програмування, які приводять до великих витрат часу та обчислювальної потужності, що не дозволяє здійснювати режим керування реального часу. Таким чином, використання складних функціональних критеріїв при побудові КК для безпосе-

реднього керування РО на нижньому ієрархічному рівні систем нераціонально.

Критерії оптимальності, засновані на показниках якості перехідних процесів, наприклад, мінімуму інтеграла квадрата помилки, вимагають адекватної апіорної інформації. А в умовах невизначеності знання статистичних характеристик (потребує значних витрат часу на їхнє визначення) вимагає виконання операції інтегрування в нескінченних границях (обмеження меж інтегрування може привести до неоптимального керування). Останнього недоліку позбавлений критерій мінімуму інтеграла суми квадратів помилки і її похідних, узятих з певними ваговими коефіцієнтами. Однак вибір цих вагових коефіцієнтів також повністю залежить від розроблювача. При цьому останній критерій має ті самі вищезгадані недоліки, як і критерій мінімуму інтеграла квадрата помилки.

КК для РО доцільно розглядати в лінійному наближенні, що дозволяє одержати вирази для параметрів настроювання регуляторів у явному вигляді.

Для таких контурів може бути застосований критерій максимального ступеня стійкості (КМСС) [90]. Він позбавлений більшості недоліків, властивих іншим критеріям. Його використання однозначно визначає параметри керуючого впливу. Цей критерій приводить, як правило, до отримання близьких до аперіодичного перехідних процесів, а для об'єктів до 3-го порядку включно – до найкращого з аперіодичних процесів. При наявності апіорної інформації про КК й об'єкт (структура, порядок) оптимальні параметри керування можуть бути зв'язані нескладними співвідношеннями з відомими характеристиками (постійні часу, запізнювання, коефіцієнт передачі) РО. В умовах невизначеності вибір оптимальних (квазіоптимальних) параметрів керування зводиться до завдання максимуму тільки однієї величини – ступеня стійкості. Це завдання може бути вирішено значно простіше, ніж знаходження екстремуму складних функціоналів.

Адаптивний КК, що використовує критерій КМСС, внаслідок його явної максимальної стійкості виявляється робастним стосовно до випадкових короточасних впливів, для яких можливе визначення статистичних характеристик й адаптація КК. З тієї ж причини при використанні принципу дуального керування може бути збільшена потужність пробних впливів, які приведуть до поліпшення співвідношення сигнал/завада на вході контуру ідентифікації й, таким чином, до підвищення завадостійкості КК.

Перераховані вище особливості КМСС визначають простоту технічної реалізації адаптивних КК для РО при їхній високій ефективності. Застосування КМСС особливо виправдано при побудові КК, які програмуються й мають невеликі обчислювальні можливості (мікроконтролери). Тому при розробленні нових методів побудови адаптивних КК нижнього рівня, за критерій оптимальності приймемо КМСС [194-196, 208]. КМСС дозволяє одержати зручні алгебраїчні вирази для підстроювання параметрів регуляторів за поточним відношенням рівнів корисного сигналу (R) до завади (Q). У розділі 6 отримано вираз, що визначає оптимальне значення постійної ча-

су адаптивного фільтра $T_{\phi} = T_{opt} = T_{\beta} \sqrt{\frac{Q}{R + \Delta}}$; $T_{\beta} = \frac{1}{K_{\beta}}$ (Δ – обмежена вели-

чина, яка виключає ділення на 0).

У цьому підрозділі розроблена структура адаптивного КК, що відрізняється простотою реалізації та високою ефективністю алгоритмів керування. Такий КК забезпечує ефективне керування РО як об'єктом ОРП із параметрами, що змінюються в широких межах.

Структура запропонованого адаптивного заводозахищеного КК для керування РО наведена на рис. 7.5.

Інформація про швидкість, яку повинен підтримувати КК, виробляється у вигляді керуючих впливів диспетчерськими підсистемами 1. Сигнал про швидкість РО за допомогою датчиків 2 надходить в адаптивний КК нижнього рівня.

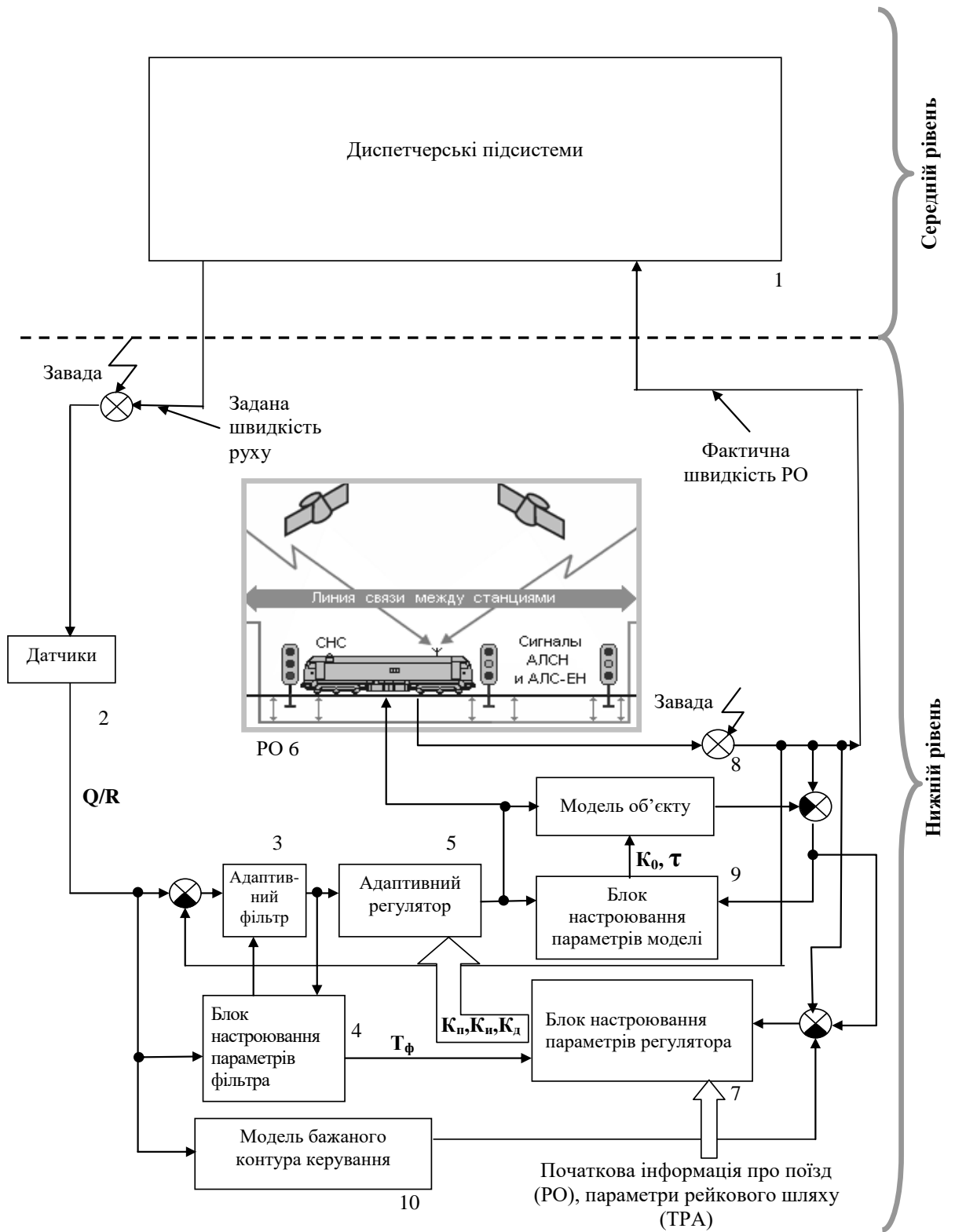


Рис. 7.5. Структура адаптивної завадозахищеної системи формування керування рухом РО

Через те, що на сигнал швидкості накладаються різні завади, в КК застосований адаптивний фільтр 3, параметри якого задаються блоком настроювання 4, що оцінює відношення сигнал/завада. У КК також може бути використана модель бажаного контуру 10. Сформульоване вище завдання синтезу КК з РО як об'єктом з розподіленими параметрами проведемо на прикладі моделі об'єкта, для якої існує аналітичне розв'язання рівняння (7.).

Відповідно до [201] перепишемо рівняння (7.2) у безрозмірному вигляді

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}, \quad (7.22)$$

де $t = \frac{\alpha \tau}{l^2}$ — безрозмірний час;

$x = \frac{x_1}{l}$ — безрозмірна координата ($0 \leq x \leq 1$);

x_1, x_{\max}, x_{\min} — поточне та граничні значення координати;

$b = \frac{al}{\lambda}$ — критерій Біо.

Для безрозмірної швидкості маємо:

$$v = \frac{V_1 - V_{\min}}{V_{\max} - V_{\min}},$$

де V_1, V_{\min}, V_{\max} — поточне та граничні значення швидкості.

При цьому нова безрозмірна керована величина $V(x, t) = \frac{V(lx, l^2 ta^{-1})}{V_{\max} - V_{\min}}$, но-

ве керування $\varphi(t) = \frac{(\tilde{\varphi} - \varphi_{\min})}{\varphi_{\max} - \varphi_{\min}}$, а початкові й граничні умови мають вигляд

$$V(x, 0) = v, \quad (7.23)$$

$$\frac{\partial V(l, t)}{\partial x} = b[\varphi_l - V(l, t)], \quad (7.24)$$

$$\frac{\partial V(0, t)}{\partial x} = b[\varphi_0 - V(0, t)]. \quad (7.25)$$

Тобто, якщо обидва кінці ОРП $x=0$ та $x=l$ з'єднані з деякими джерелами вхідного сигналу, то мають місце граничні умови [16]

$$V(+0, t) = \varphi_0(t), \quad V(l-0, t) = \varphi_l(t). \quad (7.26)$$

Відповідно до [201] і прийнятих позначень визначимо дві складові рішення в зображеннях рівняння (7.22), з яких одне має на лівій границі ОРП значення 1, а на правій – значення 0, друге має на лівій границі 0, а на правій 1:

$$V_0(x,s) = \frac{sh(l-x)\sqrt{s}}{sh\sqrt{s}}, \quad (7.27)$$

$$V_1(x,s) = \frac{shx\sqrt{s}}{sh\sqrt{s}}. \quad (7.28)$$

Шукане рішення рівняння (7.22) має такий вигляд:

$$V(x,s) = \varphi_0(s)V_0(x,s) + \varphi_1(s)V_1(x,s). \quad (7.29)$$

При $l \rightarrow \infty, V_1(x,s) = 0$ та для функції $V_0(x,s)$ одержимо

$$V_0(x,s) = \exp(-x\sqrt{s}). \quad (7.30)$$

Розкладаємо праву частину (7.30) у ряд Тейлора й, обмежуючись першим членом ряду, одержимо

$$V_0(x,s) = (1 + x\sqrt{s})^{-1}. \quad (7.31)$$

Отже, у просторі зображень рішення при $\varphi_0(s) = \frac{1}{s}$ має вигляд

$$V(x,s) = [s(1 + x\sqrt{s})]^{-1}. \quad (7.32)$$

Таке спрощення лише приблизно може відбивати динаміку об'єктів, описуваних рівняннями типу Фур'є, тому розглянемо випадок, коли довжина ОРП кінцева, $\varphi_1(t) = 0$, а заданий розподіл маси в системі підтримується, наприклад, пропорційно-півінтегральним регулятором. Розкладаючи праву частину (7.27) у ряд, відповідно до [199-201] при $\varphi_0(s) = 1/s$ одержимо ірраціональну передатну функцію ОРП

$$W_{i0}(x',s) = \sum_{i=1}^3 b_i \exp(-a_i\sqrt{s}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{i=1}^3 b_i \left(1 + \frac{a_i\sqrt{s}}{n}\right)^{-n}, \quad (7.33)$$

де $b_1 = b_2 = 1; b_3 = -1; a_1 = x; a_2 = 2kl + x; a_3 = 2kl - x, k = 0, 1, \dots, \infty$.

Уведемо нову передатну функцію пропорційно-півінтегрального регулятора (ППІ–регулятора) з незалежними настроюваннями параметрів K_n и K_n , яка має такий вигляд:

$$W(s) = K_n \left(1 + \frac{K_u}{\sqrt{s}}\right), \quad (7.34)$$

де K_n і K_u – коефіцієнти ППІ–регулятора, що настроюються.

Структурна схема моделі замкнутої системи із ППІ-регулятором наведена на рис.7.6.

У цій структурі новою є півінтегральна ланка, поява якої обґрунтована наявністю коренів, що містять \sqrt{s} , а також передатна функція моделі РО у вигляді $W_0(s) = e^{-x\sqrt{s}} + e^{-(2kl+x)\sqrt{s}} + e^{-(2kl-x)\sqrt{s}}$. Тут другий і третій доданки нехтовно малі при значній довжині поїзда ($l > 100$ м). Нижче розглянута процедура синтезу системи з новим регулятором.

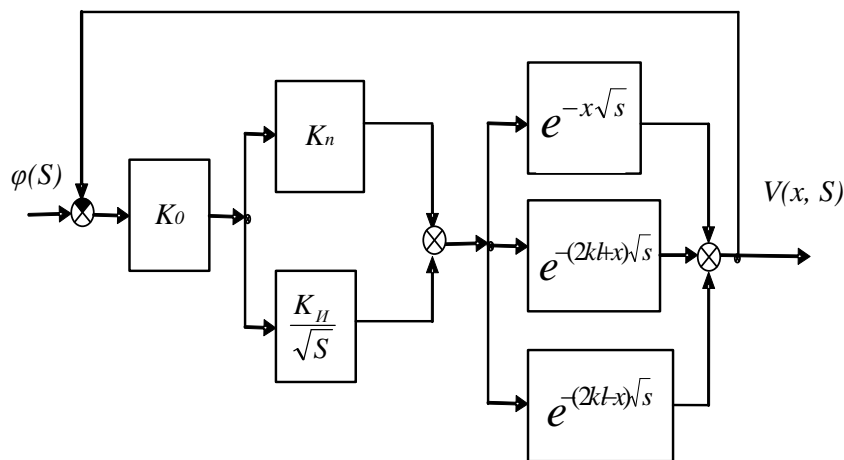


Рис. 7.6. Структурна схема замкнутого КК із ППІ-регулятором

Передатна функція замкнутої системи при $q = \sqrt{s}$ дорівнює

$$W(x, q) = \sum_{i=1}^3 W(x, q)_i,$$

$$W(x, q)_i = \frac{A(q)}{B(q)} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(K_n q^2 + K_u) K_0}{\left\{ b_i \left(1 + \frac{a_i}{n} q \right)^n \right\} q + (K_n q + K_u) K_0}. \quad (7.35)$$

Запишемо фіктивне характеристичне рівняння замкнутої системи для дограничної функції $B(q_i = -J) = 0$

$$B(q)_i = \lim_{n \rightarrow \infty} b_i \left(1 + \frac{a_i}{n} q \right)^n q + K_n K_0 q + K_u K_0 = 0. \quad (7.36)$$

Щоб знайти максимальний ступінь стійкості системи, використаємо теорему з роботи [90], за якою максимальний ступінь стійкості системи (7.35) дорівнює мінімальному кореню рівняння

$$Q_{m+2}^{(2)}(-J) = 0, \quad (7.37)$$

де $Q_{m+2}^{(2)}(-J)$ – друга похідна від виразу

$$Q_{m+2}(-J) = \left\{ \lim_{n \rightarrow \infty} b_i \left(1 - \frac{a_i J}{n} \right)^n (-J) \right\}. \quad (7.38)$$

Визначаємо першу похідну від (7.38)

$$Q_{m+2}^{(1)}(-J) = \left\{ \lim_{n \rightarrow \infty} [-a_i b_i \left(1 - \frac{a_i J}{n} \right)^n] \right\} + \left\{ \lim_{n \rightarrow \infty} n a_i b_i \left(1 - \frac{a_i J}{n} \right)^{n-1} \right\}. \quad (7.39)$$

Визначаємо другу похідну від (7.38) і дорівнюємо її 0.

$$Q_{m+2}^{(2)}(-J) = \left\{ \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{a_i J}{n} \right)^{n-2} \right\} \left\{ 2n a_i b_i \left(1 - \frac{a_i J}{n} \right)_i - \right. \\ \left. - n(n-1) a_i^2 b_i J \right\} = 0. \quad (7.40)$$

Після перетворень, переходячи у виразі (7.40) до границі, одержимо

$$J_{on.i} = \frac{2n}{a_i b_i (n+1)}. \quad (7.41)$$

З (7.33), (7.41) видно, що оптимальний корінь, який забезпечує максимальну швидкодію КК, залежить від відносної координати $x \in (0,1)$ об'єкта.

Тому маємо для $i=1,2,3$

$$J_{on1} \approx \frac{2n}{x(n+1)}; \quad (7.42)$$

$$J_{on2} \approx \frac{2n}{(2kl+x)(n+1)};$$

$$J_{on3} \approx \frac{2n}{(2kl-x)(n+1)}. \quad (7.43)$$

Для поїзда великої довжини $J_{on2} = J_{on3} \approx 0$, тоді

$$B^{(1)}(-J_{on1}) = Q_{m+2}^{(1)}(-J_{on1}) + 2J_{on1} K_n = 0, \quad (7.44)$$

або

$$K_{n.on} = -K_0^{-1} Q_{m+2}^{(1)}(2J_{on1})^{-1}, \quad (7.45)$$

звідки

$$K_{n.on} = \frac{1}{K_0} \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^{n-1}. \quad (7.46)$$

Коефіцієнт $K_{u.on}(x, -J_{on1})$ визначаємо з умови $Q(-J_{on1}) = 0$.

$$K_{u.on}(x) = \frac{4n^2}{K_0 a_i b_i} \frac{(n-1)^{n-1}}{(n+1)^{n+1}}. \quad (7.47)$$

7.4. Розроблення процедур синтезу КК для РО

Нижче розглядаються важливі питання одержання аналітичних залежностей для настроювання параметрів регуляторів з метою їхньої адаптації.

7.4.1. Контур керування з ПІ–регулятором і моделлю РО у вигляді

$$W_0(x,s) = e^{-x\sqrt{s}}$$

На рис. 7.7 подана структура такого КК.

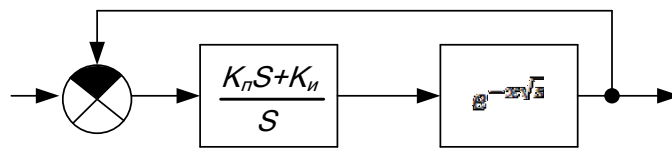


Рис. 7.7. Структура КК з ОРП та ППІ–регулятором

Передатна функція замкнутого контуру з урахуванням передатної функції класичного ПІ–регулятора така:

$$W_3(q) = \frac{K_n q^2 + K_u}{e^{xq} q^2 + K_n q^2 + K_u}$$

Розглянемо характеристичне рівняння

$$Q(q) = e^{xq} q^2 + K_n q^2 + K_u = 0.$$

Після підстановки $q = -J$ одержуємо

$$Q(-J) = J^2 e^{-xJ} + K_n J^2 + K_u = 0.$$

Для першої й другої похідних від $Q(-J)$ маємо

$$Q'(-J) = 2J e^{-xJ} - xJ^2 e^{-xJ} + 2K_n J = J(2e^{-xJ} - xJ e^{-xJ} + 2K_n) = 0,$$

$$Q''(-J) = -2x e^{-xJ} - x e^{-xJ} + x^2 J e^{-xJ} = 0.$$

Тому що e^{-xJ} не дорівнює нулю, маємо

$$x^2 J - 3x = 0.$$

Із цього рівняння одержуємо значення критерію максимального ступеня стійкості

$$J_{on} = J_{min} = -q_{min} = \frac{3}{x}.$$

Для оптимальних значень настроювань параметрів регуляторів одержуємо

$$K_{Пон} = \frac{e^{-J_{он}x}(xJ_{он}-2)}{2},$$

$$K_{Ион} = -J_{он}^2 e^{-J_{он}x} - K_{Пон}J_{он}^2.$$

Такі параметри настроювання забезпечують одержання кратних коренів q_{min} , при цьому передатна функція замкнутого КК набуває вигляду

$$W_{зз}(q) = \frac{(K_{Ион}q^2 + K_{Пон})e^{-qx}}{(q + q_{min})^2}$$

7.4.2. Контур керування об'єктом $W_0(x, s) = e^{-x\sqrt{s}}$ з пропорційно-інтегральним регулятором й адаптивним фільтром

Структура контуру показана на рис. 7.8.

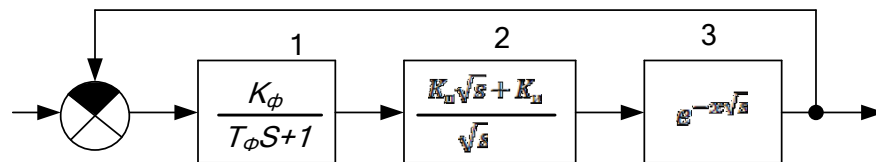


Рис. 7.8. Структура КК, що містить адаптивний фільтр 1, ПІІ-регулятор 2 та ОРП 3

У передатній функції адаптивного фільтра постійна часу така

$$T_\phi = T_{онт} = T_\beta \sqrt{\frac{Q}{R + \Delta}} \quad (\text{отримана в розділі 6}),$$

де R й Q визначають відповідно рівні, що змінюються, корисного сигналу і завади, які можуть бути використані для настроювання параметрів регулятора.

Далі виконаємо перетворення, аналогічні попередньому параграфу.

Для передатної функції замкнутого КК і характеристичного рівняння маємо

$$W_з(s) = \frac{K_\phi (K_n \sqrt{s} + K_u)}{(T_\phi s + 1) e^{x\sqrt{s}} \sqrt{s} + K_\phi K_n \sqrt{s} + K_\phi K_u}; \quad (7.48)$$

$$Q(s) = (T_\phi s + 1) e^{x\sqrt{s}} \sqrt{s} + K_\phi K_n \sqrt{s} + K_\phi K_u = 0; \quad (7.49)$$

$$Q(q) = (T_{\dot{\phi}}q^2 + 1)e^{xq}q + K_{\dot{\phi}}K_nq + K_{\dot{\phi}}K_u = 0; \quad (7.50)$$

$$Q(q) = (T_{\dot{\phi}}q^3 + q)e^{xq} + K_{\dot{\phi}}K_nq + K_{\dot{\phi}}K_u = 0.$$

Виконання перетворень, аналогічних п.7.4.1, дає вирази:

$$Q(-J) = (-T_{\dot{\phi}}J^3 - J)e^{-xJ} - K_{\dot{\phi}}K_nJ + K_{\dot{\phi}}K_u = 0;$$

$$Q'(-J) = -(3T_{\dot{\phi}}J^2 + 1)e^{-xJ} + x(T_{\dot{\phi}}J^3 + J)e^{-xJ} - K_{\dot{\phi}}K_n = 0;$$

$$Q''(-J) = -6T_{\dot{\phi}}Je^{-xJ} + x(3T_{\dot{\phi}}J^2 + 1)e^{-xJ} + x(3T_{\dot{\phi}}J^2 + 1)e^{-xJ} - x^2(T_{\dot{\phi}}J^3 + J)e^{-xJ} = 0;$$

$$Q''(-J) = e^{-xJ}[-6T_{\dot{\phi}}J + x(3T_{\dot{\phi}}J^2 + 1) + x(3T_{\dot{\phi}}J^2 + 1) - x^2(T_{\dot{\phi}}J^3 + J)] = 0;$$

$$Q''(-J) = e^{-xJ}[-6T_{\dot{\phi}}J + x3T_{\dot{\phi}}J^2 + x + x3T_{\dot{\phi}}J^2 + x - x^2T_{\dot{\phi}}J^3 - x^2J] = 0;$$

$$[x^2T_{\dot{\phi}}J^3 - 6xT_{\dot{\phi}}J^2 + (6xT_{\dot{\phi}} + x^2)J + 2x]e^{-xJ} = 0;$$

$$J^3 - \frac{6}{x}J^2 + \frac{6T_{\dot{\phi}}+x}{xT_{\dot{\phi}}}J + \frac{2}{xT_{\dot{\phi}}} = 0.$$

У результаті отримуємо остаточне рівняння:

$$\frac{xT_{\dot{\phi}}}{2}J^3 - 3T_{\dot{\phi}}J^2 + \frac{6T_{\dot{\phi}}+x}{2}J + 1 = 0.$$

Середньоарифметичний корінь останнього рівняння може бути отри- маний, наприклад, за методикою [66]

$$J_{ср.а.} = \frac{1}{6T_{\dot{\phi}}+x}.$$

Цей корінь служить мірою швидкості протікання перехідних процесів.

Якщо $J_{ср.а.}$ збільшити (зменшити) в k раз, то перехідний процес, зали- шаючись подібним до себе, буде протікати в k раз швидше (повільніше). Якщо в замкнутому КК забезпечити кратність коренів характеристичного рівняння за рахунок вибору параметрів настроювання регулятора за серед- ньоарифметичним коренем $J_{он} = J_{ср.а.}$, то для параметрів настроювання регу- лятора й для передатної функції замкнутого КК одержуємо вирази

$$K_n(-J_{он}) = \frac{[(-3T_{\dot{\phi}}J_{он}^2 - 1)e^{-xJ_{он}} + x(T_{\dot{\phi}}J_{он}^3 + J_{он})e^{-xJ_{он}}]}{K_{\dot{\phi}}}; \quad (7.55)$$

$$K_u(-J_{он}) = \frac{[(T_{\dot{\phi}}J_{он}^3 + J_{он})e^{-xJ_{он}} + K_{\dot{\phi}}K_nJ_{он}]}{K_{\dot{\phi}}}, \quad (7.56)$$

$$W_{зз}(q) = \frac{K_nK_{\dot{\phi}}q + K_nK_{\dot{\phi}}}{(q + J_{он})^2}.$$

При цьому в замкнутому КК буде забезпечено оптимальне за швидкістю протікання перехідного процесу.

7.4.3. Розроблення структур регуляторів для керування ОРП

Для побудови регуляторів запропонуємо спрощені розподілені ланцюги, що складаються з елементів C_0 , R_0 .

При використанні таких ланцюгів нижче запропоновані структури двох регуляторів на елементах аналогової техніки.

На рис. 7.9 показано варіант реалізації півінтегрального регулятора з передатною функцією

$$W_p(s) = -\frac{Z_{oc}(s)}{R}$$

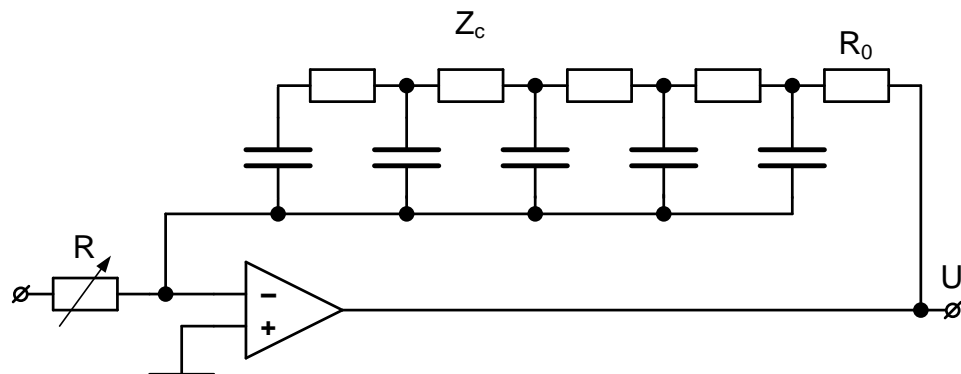


Рис. 7.9. Варіант реалізації півінтегрального регулятора

З урахуванням співвідношень

$$Z_{oc} = \sqrt{\frac{R_0}{C_0 s}} \tau_0 = R_0 C_0$$

передатна функція має вигляд

$$W_p(s) = -\frac{Z_{oc}(s)}{R} = -\frac{R_0}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{\tau_0 s}} = -\frac{K_u}{\sqrt{s}}$$

Для цього регулятора параметр K_u настроювання визначається зі співвідношення

$$K_u = -\frac{R_0}{R\sqrt{\tau_0}}$$

Аналогічно може бути побудована схема пропорційно-півінтегрально-півдифференціального регулятора на аналогових операційних підсилювачах й RC-елементах (рис. 7.10).

Співвідношення, що характеризують цей регулятор, наведені нижче

$$W(s) = K_{n1} \left(K_{n2} + \frac{K_u}{\sqrt{s}} + K_d \sqrt{s} \right);$$

$$K_{n1} = \frac{R_2'}{R_1} = \frac{R_2'}{R_2} = \frac{R_2'}{R_8};$$

$$K_{n2} = \frac{R_4}{R_5}; K_d = \frac{R_6}{R_0} \sqrt{R_{01} C_{01}}; K_u = \frac{R_0}{R \sqrt{R_0 C_0}}.$$

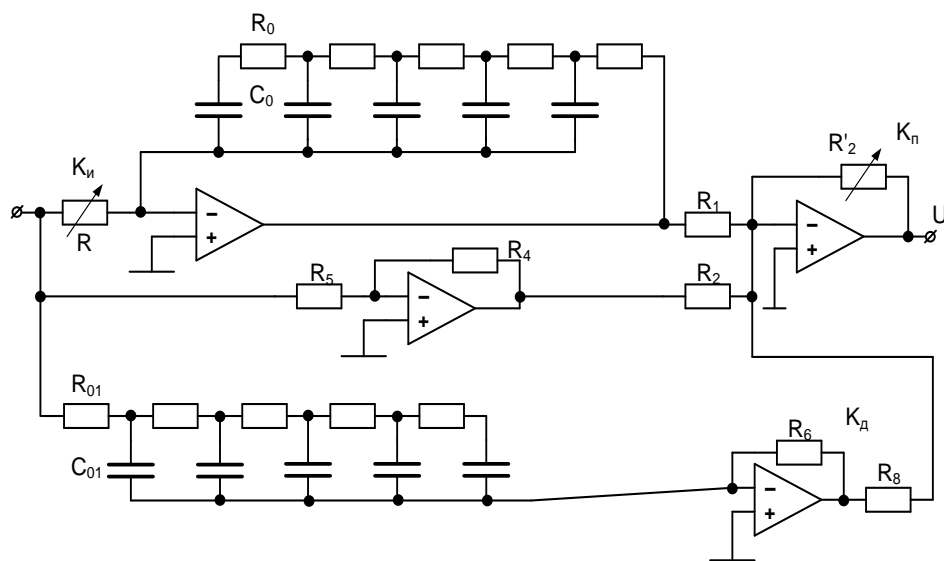


Рис. 7.10. Варіант реалізації пропорційно-півінтегрально-півдифференціального регулятора

У розділі 8 надані варіанти реалізації різних цифрових регуляторів.

Висновки

1. Обґрунтовано проблему розроблення швидкодіючих заводозахисних КК для РО з урахуванням розподіленої маси й наявності хвилеподібних процесів при поширенні сигналів і зусиль за довжиною поїзда.

2. Показано, якщо керований ОРП містить у передатній функції ірраціональні ланки, то оптимізувати перехідний процес у замкнутому КК буде регулятор, що має у своїй структурі пропорційні, півдифференціальні, півінтегральні, півінерційні й інші ірраціональні ланки.

3. Обґрунтовано модель РО, яка відображує реальні процеси в поїзді з врахуванням запізнювання за довжиною поїзда, яке залежить не тільки від точки (координати), що визначає процес формування й передачі сигналів керування, але й від часу. Така модель враховує поширення механічних хвиль в обидва кінці поїзда.

4. Доведено умови, при яких модель РО, описувану рівняннями в частинних похідних, можна замінити звичайним диференціальним рівнянням з еквівалентним постійним (для даної координати x) запізнюванням. Це дозволило, з одного боку, спростити математичні моделі РО (замінити сіткову модель великої розмірності одним рівнянням), а з іншого боку, – застосувати до синтезу регуляторів для ОРП відомі аналітичні методи, розроблені для об'єктів з постійним запізнюванням.

5. Отримано прості алгебраїчні вирази для автопідстроювання параметрів регуляторів у залежності від поточного відношення рівнів сигналу R до завади Q , змінюваних у часі параметрів моделі РО (коефіцієнт передачі, еквівалентне запізнення), що на відміну від відомих методів забезпечує динамічну адаптацію параметрів регуляторів. Динамічна адаптація надає змогу розширити діапазон працездатності КК при змінюванні запізнювання в широких межах від 0,1 до 1 с і більше та значно збільшує швидкодію процесу адаптації КК і забезпечує близьку до оптимальних якостей перехідних процесів при зміні параметрів у широких межах.

6. Проведено синтез ППІ–регулятора для замкнутого КК, який містить адаптивний фільтр із оптимальною сталою часу. Для керування РО запропоновані аналогові варіанти реалізації півінтегрального регулятора й пропорційно–півінтегрально–півдифференціального регулятора на аналогових операційних підсилювачах й RC –елементах.

РОЗДІЛ 8

СИНТЕЗ КОНТУРІВ КЕРУВАННЯ РО, ПОДАНИХ МОДЕЛЯМИ З ЕКВІВАЛЕНТНИМ ЗАПІЗНЮВАННЯМ

З огляду на широке використання при побудові КК у різних галузях промисловості ПІ- та ПІД- регуляторів [29], а також їхні достатньо високі динамічні властивості будемо синтезувати адаптивні регулятори з врахуваннями законами керування.

8.1. Безпосередній синтез закону керування для КК з бажаними характеристиками

Нехай рівняння об'єкта зі змінними параметрами має вигляд

$$\sum_{i=1}^n a_i(t)y^{(i)}(t) + y(t) = k_0(t)u(t - \tau(x)) + \lambda(t - \tau(x)), \quad (8.1)$$

де $a_i(t)$, $k_0(t)$ – змінні параметри об'єкта керування;

$y(t)$ – вихідний сигнал об'єкта;

$u(t)$ – сигнал керування;

$\lambda(t)$ – збурювання по навантаженню;

$\tau(x)$ – запізнювання в точці x .

Рівнянню (8.1) відповідає передатна функція по керуванню

$$W_o(x, s) = \frac{k_0(t)e^{-\tau(x)s}}{\sum_{i=0}^n a_i(t)s^i + 1} \quad (8.2)$$

З урахуванням позначення $\tau(x) = \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}$ з (7.21), (8.2) приймає вигляд

$$W_0(x,s) = \frac{k_0(t) e^{-\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} s}}{\sum_{i=0}^n a_i(t) s + 1} \quad (8.3)$$

Можливі наступні варіанти зміни параметрів об'єкта керування, при яких компоненти вектора параметрів об'єкта керування $k = (k_0, a_1, \dots, a_n)$ належать одній з множи

$$k = \{k_{0\min} < k_0(t) < k_{0\max} < \infty, a_i = \text{const}\}, \quad (8.4)$$

$$k = \{k_0 = \text{const}, a_{i\min} < a_i(t) < a_{i\max}\}. \quad (8.5)$$

Вираження (8.4) відповідає випадку зміни в часі статичного параметра об'єкта – коефіцієнта передачі k_0 , а (8.5) динамічних параметрів об'єкта a_i , тобто визначальних сталих часу.

Нехай корені характеристичного рівняння

$$D_n(s) = \sum_{i=1}^n a_i s^i + 1 = 0,$$

які відповідають (8.2), дійсні, негативні і різні, що можна представити у вигляді наступного співвідношення

$$\sum_{i=1}^n a_i s^i + 1 = \prod_{i=1}^n (\alpha T_i s + 1), \quad 0 < \alpha_{\min} < \alpha < \alpha_{\max} \quad (8.6)$$

Можна припустити, що для кожного коефіцієнта з (8.4) і (8.5) існує керуючий вплив у вигляді стандартного ППД– закону регулювання

$$u(t) = k_{\Pi} e(t) + k_{\text{И}} \int_0^t e(h) dh + k_{\text{Д}} e'(t), \quad (8.7)$$

$$e(t) = x(t) - y(t), \quad e'(t) = \frac{e(t)}{dt} \quad (8.8)$$

який при певному виборі вектора параметрів настроювання регулятора

$$k = (k_{\Pi}, k_{\text{И}}, k_{\text{Д}}), \quad (8.9)$$

забезпечує такий характер відпрацьовування східчастих впливів за завданням

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ x_0 & \text{при } t \geq 0 \end{cases} \quad (8.10)$$

або за навантаженням

$$\lambda(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ \lambda_0 & \text{при } t \geq 0, \end{cases} \quad (8.11)$$

що оптимізується заданий критерій якості керування, наприклад, мінімізується тривалість перехідних процесів. Як такий критерій будемо використовувати КМСС. На основі цього критерію, характеристичне рівняння замкнутого контуру набуває такий вид, що найближчий до уявної осі корінь цього рівняння відхиляється від уявної осі на максимально можливу відстань (при даній структурі КК) за рахунок відповідного вибору параметрів керуючого пристрою – регулятора.

У результаті перехідні процеси в КК відрізняються найбільшою швидкодією в порівнянні з контурами, які містять регулятори, синтезовані на основі інших критеріїв оптимальності. Крім того, отримані перехідні процеси мають досить незначне перерегулювання.

Метою адаптивного керування є відпрацьовування впливу, який задає потрібне значення параметра $x(t)$ та компенсація збурювань $\lambda(t)$ незалежно від значень вектора k .

Проектування КК являє собою визначення алгоритму цифрового регулятора, що забезпечує бажаний перехідний процес у контурі безпосереднього цифрового керування (БЦК). Для розімкнутої частини контуру, можна записати рівняння

$$Y(z) = D(z)W_H(z)[X(z) - Y(z)], \quad (8.12)$$

де $Y(z)$, $X(z)$ – z - перетворення керованої координати та задаючого впливу регулятора БЦК, а відповідна передатна функція приведеної безперервної частини об'єкта керування така $W_{II}(z) = z\{W_9(s)W_0(s)\}$,

де $W_9(s)$ – передатна функція екстраполятора;

$W_0(s)$ – передатна функція безперервної частини об'єкта керування.

Рівняння (8.12) вирішується щодо передатної функції цифрового регулятора:

$$D(z) = \frac{1}{W_{II}(z)} \cdot \frac{Y(z)}{X(z) \left[1 - \frac{Y(z)}{X(z)} \right]} \quad (8.13)$$

z – передатна функція приведеної безперервної частини (ПБЧ) об'єкта керування $W_{II}(z)$ визначається згідно [39].

Для багатьох транспортних, енергетичних та інших об'єктів небажаним є коливальний перехідний процес керованої змінної $y(t)$, що викликає часті переключення виконавчого механізму. Тому припустимо, що в динамічному режимі бажаним є аперіодичний перехідний процес. Тобто при подаванні у якості завдання на вхід КК східчастого одиничного збурювання замкнутий КК повинен вести себе як безперервна аперіодична ланка першого порядку із запізнюванням, тоді:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{\omega_\beta}{s + \omega_\beta} e^{-\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} s} \quad (8.14)$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1 - e^{-\omega_\beta \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}}}{1 - e^{-\omega_\beta \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}}} z^{-N-1} \quad (8.15)$$

де $\omega_\beta = \frac{1}{T_\beta}$ – параметр, що дорівнює бажаній частоті сполучення, яка визначає необхідну смугу пропускання ЛАЧХ аперіодичної ланки, що моделює динаміку замкнутого КК;

$$N \geq \frac{\tau(x)}{T} + 1 \geq \frac{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}}{T} + 1, \quad T - \text{період квантування}$$

Підстановка (8.15) в (8.13) дає передатну функцію цифрового регулятора в наступному виді:

$$D(z) = \frac{1}{W_H(z)} \cdot \frac{(1 - e^{-\omega\beta T}) z^{-N-1}}{1 - e^{-\omega\beta T} z^{-1} - (1 - e^{-\omega\beta T}) z^{-N-1}} \quad (8.16)$$

8.2. Синтез регулятора для КК, що містить адаптивний фільтр і модель РО у вигляді ланки першого порядку із запізнюванням

У результаті послідовного з'єднання моделі об'єкта керування (РО) і адаптивного фільтра одержимо передатну функцію

$$W_0(s) = \frac{K_H e^{-s\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}}}{(T_{1H}s + 1)(T_{onm}s + 1)} \quad (8.17)$$

де T_{1H} – стала часу моделі РО; K_H – коефіцієнт передачі приведеної безперервної частини КК; T_{onm} – оптимальна стала часу адаптивного фільтру.

Виконавши необхідні z -перетворення, одержуємо передатну функцію цифрового регулятора:

$$D(z) = \frac{(1 - e^{-\omega\beta T})(1 - e^{-\frac{T}{T_{1H}} z^{-1}})(1 - e^{-\frac{T}{T_{onm}} z^{-1}})}{K_H \left\{ 1 - e^{-\omega\beta T} z^{-1} - (1 - e^{-\omega\beta T}) z^{-N-1} \right\} (C_1 + C_2 z^{-1})}, \quad (8.18)$$

де N – найбільше ціле число $N \geq \frac{\tau(x)}{T} + 1 \geq \frac{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}}{T} + 1$, а величини C_1 та C_2

мають вигляд

$$C_1 = 1 + \frac{T_{onm} e^{-\frac{T}{T_{onm}}} - T_{1H} e^{-\frac{T}{T_{1H}}}}{T_{1H} - T_{onm}},$$

$$C_2 = e^{-\frac{T}{T_{1H}} - \frac{T}{T_{onm}}} + \frac{T_{onm} e^{-\frac{T}{T_{1H}}} - T_{1H} e^{-\frac{T}{T_{onm}}}}{T_{1H} - T_{onm}}.$$

Розглянемо характеристичне рівняння дискретної передатної функції (8.18). Також як і при керуванні об'єктами першого порядку, для алгоритму БЦК (8.18) у керуючому впливі можуть виникати загасаючі

коливання із частотою квантування ω_0 . Ці коливання викликаються полюсами характеристичного рівняння в околиці $z=-1$, пов'язаними з будь-яким коефіцієнтом у знаменнику (8.18).

Співмножник $(C_1+C_2z^{-1})$ може обумовити полюс

$$z = -\frac{C_1}{C_2}. \quad (8.19)$$

Для другого співмножника знаменника одержуємо

$$[1 - e^{-\omega_\beta T} z^{-1} - (1 - e^{-\omega_\beta T}) z^{-N-1}] = (1 - z^{-1}) \{1 + (1 - e^{-\omega_\beta T}) z^{-1} + (1 - e^{-\omega_\beta T}) z^{-2} + \dots + (1 - e^{-\omega_\beta T}) z^{-N}\}.$$

Це вираження має корінь при $z=+1$. Поклавши в знаменнику (8.18) $z=+1$, можемо одержати алгоритм керування, вільний від загасаючих коливань у керуючому впливі, що дуже важливо для керування РО з розподіленими параметрами

$$D(z) = \frac{(1 - e^{-\omega_\beta T})(1 - e^{-\frac{T}{T_{1H}} z^{-1}})(1 - e^{-\frac{T}{T_{onm}} z^{-1}})}{K_H C_3 [1 + N(1 - e^{-\omega_\beta T})](1 - z^{-1})}, \quad (8.20)$$

$$\text{у якому } C_3 = (1 - e^{-\frac{T}{T_{1H}}})(1 - e^{-\frac{T}{T_{onm}}}) = C_1 + C_2.$$

Підстановкою виражень C_1 та C_2 перетворимо рівняння (8.20) до наступної форми:

$$D(z) = \frac{(e^{\frac{T}{T_{1H}}} + e^{\frac{T}{T_{onm}}} - 2)(1 - e^{-\omega_\beta T})}{K_H (e^{\frac{T}{T_{1H}}} - 1)(e^{\frac{T}{T_{onm}}} - 1) [1 + \{\frac{\pi}{T} + 1\} (1 - e^{-\omega_\beta T})]} \times \left(\frac{x^2}{\dots} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left[1 + \frac{(1 - e^{-\frac{T}{T_{1H}}})(1 - e^{-\frac{T}{T_{onm}}})}{(e^{\frac{T}{T_{1H}}} + e^{\frac{T}{T_{onm}}} - 2)(1 - z^{-1})} + \frac{1 - z^{-1}}{e^{\frac{T}{T_{1H}}} + e^{\frac{T}{T_{onm}}} - 2} \right]. \quad (8.21)$$

Відомо загальне подання дискретної передатної функції ПД-регулятора БЦК в стандартній формі Z-перетворення [26, 39, 41, 42]:

$$D(z) = K_n \left[1 + \frac{T}{T_H(1-z^{-1})} + \frac{T_D}{T}(1-z^{-1}) \right]. \quad (8.22)$$

Співставлення виражень (8.21), (8.22) показує, що для керування об'єктом другого порядку із запізнюванням (8.17) у режимі БЦК оптимальним є ПД-регулятор. Порівняння відповідних коефіцієнтів у вираженнях (8.21) і (8.22) дозволяє одержати співвідношення для оптимального настроювання ПД-регулятора БЦК

$$K_{Понм} = \frac{\frac{T}{e^{\frac{T}{T_H}} + e^{\frac{T}{T_{онм}} - 2}}(1 - e^{-\omega_\beta T})}{K_H \frac{T}{(e^{\frac{T}{T_H}} - 1)(e^{\frac{T}{T_{онм}} - 1)} [1 + \{ \frac{x^2}{T} + 1 \} (1 - e^{-\omega_\beta T})]}}; \quad (8.23)$$

$$T_{Ионм} = \frac{T(e^{\frac{T}{T_H}} + e^{\frac{T}{T_{онм}} - 2})}{\frac{T}{(e^{\frac{T}{T_H}} - 1)(e^{\frac{T}{T_{онм}} - 1)}}}; \quad (8.24)$$

$$T_{Донм} = \frac{T}{\frac{T}{e^{\frac{T}{T_H}} + e^{\frac{T}{T_{онм}} - 2}}}. \quad (8.25)$$

Величина $\omega_\beta = 1/T_\beta$, а стала часу замкнутої системи БЦК $T_\beta = T_{1H} + T_{онм}$ є параметром настроювання й входить тільки у вираження (8.23) для обчислення оптимального коефіцієнта підсилення регулятора. При цьому необхідно пам'ятати, що величина $\omega_\beta < \frac{1}{T_{1H} + T_{онм}}$.

З рівнянь (8.23), (8.24), (8.25) можна одержати оптимальні значення для настроювання параметрів безперервних регуляторів, якщо знайти межі для виражень настроювання цифрових параметрів ПІ й ПД-регуляторів при $T \rightarrow 0$. Тоді для безперервного ПІ-регулятора оптимальні параметри настроювання такі:

$$k_{Ионм} = \frac{\omega_\beta T_{1H}}{K_H(1 + \omega_\beta \pi(x))} = \frac{\omega_\beta T_{1H}}{K_H(1 + \omega_\beta NT)} = \frac{\omega_\beta T_{1H}}{\frac{x^2}{T} K_H(1 + \omega_\beta \{ \frac{\pi}{T} + 1 \})}; \quad (8.26)$$

$$\omega_{\beta} < \frac{1}{T_{1H}}, \quad T_{H_{onm}} = T_{1H} \quad (8.27)$$

Для безперервного ПД-регулятора:

$$k_{H_{onm}} = \frac{\omega_{\beta}(T_{1H} + T_{onm})}{K_H(1 + \omega_{\beta}NT)} = \frac{\omega_{\beta}(T_{1H} + T_{onm})}{\left(\frac{x^2}{T}\right)^{\frac{1}{3}} K_H(1 + \omega_{\beta}\{\frac{\pi}{T} + 1\})}; \quad (8.28)$$

$$T_H = T_{1H} + T_{onm}; \quad (8.29)$$

$$T_{\mathcal{L}} = \frac{T_{1H} T_{onm}}{T_{1H} + T_{onm}} \quad (8.30)$$

Сталі часу інтегрування й часу диференціювання, згідно (8.24),(8.25) та (8.29), (8.30) визначаються тільки на основі сталої- часу об'єкта та періоду квантування й не залежать від параметра настроювання ω_{β} і часу запізнювання. Тому ці значення можна встановити на зазначених рівнях і бажаний аперіодичний процес може бути отриманий за допомогою настроювання статичного коефіцієнта підсилення регулятора $k_{\mathcal{L}}$.

8.3. Розроблення процедури розрахунку параметрів адаптивних регуляторів за критерієм максимального ступеня стійкості

У практиці дослідження різних автоматизованих систем керування математичні моделі одержують у результаті ідентифікації параметрів реальних об'єктів. Методи ідентифікації представлені у багатьох роботах, наприклад, [209-211]. На основі цих методів з використанням принципу розподіленого керування можуть бути отримані рівняння об'єктів з одним входом й одним виходом. Передатна функція такого об'єкта може бути представлена у вигляді:

$$W_0(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}, \quad (8.31)$$

де $Y(s)$ – вихідний сигнал; $U(s)$ – вхідний сигнал.

У деяких випадках порядок рівняння (8.31) можна із заданою точністю понизити. Але на практиці при побудові локальних контурів регулювання, найчастіше динамічні властивості об'єктів керування визначають за кривою розгону [228]. При цьому часто застосовують моделі об'єкта керування: у вигляді інтегруючої або аперіодичної ланок першого або другого порядку із запізнюванням або у вигляді m послідовно включених аперіодичних ланок. Такими моделями може бути описане значне число об'єктів у різних галузях промисловості та РО залізничного транспорту.

У першому випадку диференціальне рівняння моделі РО й відповідна йому передатна функція мають вигляд:

$$T_{1H} y(t) + y(t) = K_H u(t - \tau(x)), \quad (8.32)$$

$$W_0(s) = \frac{K_H e^{-\tau(x)s}}{T_{1H}s + 1} = \frac{K_H e^{-s \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}}}{T_{1H}s + 1} \quad (8.33)$$

де T_{1H} – домінуюча стала часу;

$$\tau(x) = \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} - \text{еквівалентний час запізнювання};$$

x – відносна координати довжини поїзду у моделі РО;

K_H – статичний коефіцієнт передачі.

У другому випадку диференціальне рівняння має вигляд:

$$\sum_{i=1}^m a_i y^i(t) + y(t) = K_H u(t) \quad (8.34)$$

При цьому можна записати два типи передатних функцій, що відповідають диференціальному рівнянню (8.34):

$$W_0(s) = \frac{K_H}{(T_H s + 1)^{m(x)}}; \quad (8.35)$$

$$W_0(s) = \frac{K_y}{\prod_{i=1}^{m(x)} (T_{iH} s + 1)}$$

У багатьох практичних випадках вираження (8.34), (8.35) можуть бути приведені до виду (8.33) і навпаки. Це впливає з наступного граничного переходу:

$$\lim_{m(x) \rightarrow \infty} \frac{K_H}{(T_H s + 1)^{m(x)}} = \lim_{m(x) \rightarrow \infty} \frac{K_H}{\left(\frac{\tau(x)}{m(x)} s + 1\right)^{m(x)}} = K_H e^{-\tau(x)s} \quad (8.36)$$

Якщо є математичний опис об'єкта (8.35), то згідно (8.36) еквівалентний час запізнювання можна прийняти рівним $\tau(x) \approx T_H m(x)$.

Для керування об'єктами, що мають передатні функції (8.33), (8.35), (8.36), широко використовуються регулятори, що формують П-, ПІ-, ПІД- закони регулювання. З огляду на широке поширення цих законів регулювання, їх високі техніко-економічні показники будемо застосовувати при синтезі ПІ та ПІД- закони регулювання.

При синтезі структури адаптивних регуляторів необхідно встановити залежність параметрів настроювання регуляторів від характеристик завад та об'єкту керування – РО (для рухомих об'єктів залізничного транспорту їхні параметри та характеристики задаються при формуванні поїздів) що дає можливість застосувати адаптацію) при обраному критерії оптимізації.

Визначимо процедуру настроювання параметрів адаптивних регуляторів, що управляють об'єктами з передатними функціями (8.35), (8.36).

Співвідношення (8.35) відповідає випадку, коли корені характеристичного рівняння, що описує об'єкт керування, кратні, дійсні й негативні:

$$D_m(s) = (T_H s + 1)^{m(x)} = 0 \quad (8.37)$$

Розглянемо ПІД-регулятор з незалежними параметрами настроювань

$$u(t) = k_{II}(t) \left\{ 1 + \int_0^t [1/T_H(h)] e(h) dh + T_H(t) \frac{de(t)}{dt} \right\}, \quad (8.38)$$

де $k_{II}(t)$ – статичний коефіцієнт підсилення;

$T_H(t)$ – стала часу інтегратора;

$T_D(t)$ – стала часу дифференціатора.

Використовуючи результати роботи [90], у загальному виді співвідношення для КМСС має вигляд

$$J = - \max_{i=1, \infty} \min \operatorname{Re} s_i, \quad (8.39)$$

де s_i – корені характеристичного рівняння.

Залежність величини J КМСС від мінливих у часі параметрів об'єкта керування може бути визначена в результаті аналізу характеристичного рівняння замкнутого КК, що містить ПД–регулятор й об'єкт керування з відповідним характеристичним рівнянням

$$D_m(s) = s(T_H s + 1)^{m(x)} + K_H k_{II} (T_D s^2 + s + \frac{1}{T_H}) = 0 \quad (8.40)$$

Для такого КК максимальний ступінь стійкості визначається з рівняння (8.40) після заміни в ньому s на $-J$ й наступного диференціювання. У результаті отримуємо систему рівнянь:

$$D_{m+1}(-J) = -J(1 - T_H J)^{m(x)} + K_H k_{II} (T_D J^2 - J + \frac{1}{T_H}) = 0, \quad (8.41)$$

$$D'_{m+1}(-J) = m(x) T_H J (1 - T_H J)^{m(x)-1} - (1 - T_H J)^2 + K_H k_{II} (T_H T_D J - 1) = 0, \quad (8.42)$$

$$D''_{m+1}(-J) = -m(x)[m(x) - 1] T_H^2 J (1 - T_H J)^{m(x)-2} + 2m(x) T_H (1 - T_H J)^{m(x)-1} + 2K_H T_D = 0 \quad (8.43)$$

$$D'''_{m+1}(-J) = m(x)[m(x) - 1][m(x) - 2] T_H^3 J (1 - T_H J)^{m(x)-3} - 3m(x)[m(x) - 1] T_H^2 (1 - T_H J)^{m(x)-2} = 0 \quad (8.44)$$

З рівняння (8.44) отримуємо вираження для оптимального значення максимального ступеня стійкості

$$J_{opt} = \frac{3}{T_H [m(x) + 1]} \quad (8.45)$$

Підставкою (8.45) в (8.43) і наступним рішенням спільно рівнянь (8.40), (8.41) і (8.42), отримуємо вираження для оптимальних налаштувань розглянутого ПІД-регулятора:

$$k_{\Pi opt} = \frac{5m(x) - 4}{m(x) + 1} \cdot \left(\frac{m(x) - 2}{m(x) + 1} \right)^{m(x)-2} \cdot \frac{1}{K_H}; \quad (8.46)$$

$$T_{\Pi opt} = \frac{2[5m(x) - 4][m(x) + 1]^2}{27m(x)[m(x) - 1]} \cdot T_H; \quad (8.47)$$

$$T_{D opt} = \frac{m(x)[m(x) + 1]}{2[5m(x) - 4]} \quad (8.48)$$

Аналогічно можуть бути визначені оптимальні параметри налаштувань для випадку використання ПІ-регулятора шляхом виключення в (8.38) диференціальної складової.

$$J_{opt} = \frac{2}{T_H (m(x) + 1)}; \quad (8.49)$$

$$k_{\Pi opt} = \left(\frac{m(x) - 1}{m(x) + 1} \right)^{m(x)-1} \cdot \frac{1}{K_H}; \quad (8.50)$$

$$T_{\Pi opt} = \frac{(m(x) + 1)^2}{4m(x)} \cdot T_H \quad (8.51)$$

Уведемо в об'єкт із передатною функцією $W_0(p) = K_n e^{-\tau(x)s}$, що містить ланку із еквівалентним запізнюванням, синтезований (розділ 6) адаптивний фільтр із оптимальною сталою часу

$$W_{\phi}(s) = \frac{1}{T_{opt} s + 1}$$

де

$$T_{opt} = T_{\beta} \sqrt{\frac{Q}{R + \Delta}}$$

Будемо досліджувати динамічні властивості КК з регуляторами різних типів, припускаючи, що параметри об'єкта керування й фільтра в процесі експлуатації міняються в широких межах.

Тут поставлене завдання знайти зв'язок між параметрами об'єкта, адаптивного фільтра й параметрами настроювання різних типів регуляторів. Як критерій оптимізації обрано КМСС.

Розглянемо замкнутий КК для випадку, коли об'єкт керування (неперервна частина об'єкту КК) описується ланкою із еквівалентним запізнюванням

$$W_H(s) = K_H e^{-\tau(x)s} .$$

З урахуванням наявності у цифро-аналоговій моделі КК екстраполятору наведена безперервна частина (НБЧ) КК має вигляд

$$W_0(s) = \frac{K_H 2^{n_a - n_y} (1 - e^{-Ts}) e^{-\tau(x)s}}{s} \approx \frac{k_0}{e^{s \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}}} \quad (8.52)$$

де

$$k_0 = K_H T 2^{n_a - n_y}$$

(n_a, n_y - відповідно кількість розрядів АЦП та ЦАП),

$$T\text{-період дискретизації, } \tau(x) = \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} .$$

В ланцюг зворотного зв'язку НБЧ додатково включені диференціатори першого й другого порядку, адаптивні фільтри й пропорційний елемент. Введення таких зв'язків дозволяє сформувати, наприклад, ПДД-закон регулювання.

Для даного випадку передатна функція замкнутого КК має вигляд

$$W_3(s) = \frac{k_0 k_{II} W_{\phi 1}(s)}{\left(T_{onm} s + 1\right) s e^{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 \left[k_{D1} s^3 W_{\phi 4}(s) + k_D s^2 W_{\phi 3}(s) + k_{II} s W_{\phi 2}(s) + k_{II} W_{\phi 1}(s) \right]} \quad (8.53)$$

З (8.53) характеристичне рівняння замкнутого КК може бути представлено вираженням

$$D(\lambda) = \left(T_{onm} \lambda + 1\right) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 \left[k_{D1} \lambda^3 W_{\phi 4}(\lambda) + k_D \lambda^2 W_{\phi 3}(\lambda) + k_{II} \lambda W_{\phi 2}(\lambda) + k_{II} W_{\phi 1}(\lambda) \right] = 0 \quad (8.54)$$

Розглянемо деякі окремі випадки законів керування для РО, припустивши, не обмежуючи загальності

$$W_{\phi 4}(\lambda) = W_{\phi 3}(\lambda) = W_{\phi 2}(\lambda) = W_{\phi 1}(\lambda) = 1.$$

У цьому випадку характеристичне рівняння (8.54) спрощується:

$$D(\lambda) = \left(T_{onm} \lambda + 1\right) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 \left[k_{D1} \lambda^3 + k_D \lambda^2 + k_{II} \lambda + k_{II} \right] = 0. \quad (8.55)$$

Будемо шукати параметри настроювання наступних законів керування: I, III, ПД, ПДД, ПДДД, ПДДДД. Зазначені закони обрані, виходячи з можливості їхньої практичної реалізації з використанням диференціаторів першого й другого порядку.

Для названих законів керування характеристичні рівняння замкнутих КК мають такий вигляд:

I-закон

$$D(\lambda) = \left(T_{onm} \lambda + 1\right) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 k_{II} = 0, \quad (8.56)$$

III-закон

$$D(\lambda) = (T_{onm} \lambda + 1) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 [k_{II} \lambda + k_{II}] = 0, \quad (8.57)$$

ПД–закон

$$D(\lambda) = (T_{onm} \lambda + 1) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 [k_{D} \lambda + k_{II}] = 0, \quad (8.58)$$

ПДД–закон

$$D(\lambda) = (T_{onm} \lambda + 1) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 [k_{D} \lambda^2 + k_{II} \lambda + k_{II}] = 0, \quad (8.59)$$

ПДДД–закон

$$D(\lambda) = (T_{onm} \lambda + 1) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 [k_{D1} \lambda^2 + k_{D} \lambda + k_{II}] = 0, \quad (8.60)$$

ПДДДД–закон

$$D(\lambda) = (T_{onm} \lambda + 1) \lambda e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 [k_{D1} \lambda^3 + k_{D} \lambda^2 + k_{II} \lambda + k_{II}] = 0. \quad (8.61)$$

У рівняння (8.56)–(8.61) входить T_{onm} адаптивного фільтра.

Визначимо максимальний ступінь стійкості для зазначених вище законів. При цьому диференціюючи (8.56) один, (8.57) і (8.58) два, (8.59) і (8.60) три, (8.61) чотири рази, відповідно, одержимо:

для I–закону

$$D'(\lambda) = \left[\left\{ \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \right\} T_{onm} \lambda^2 + (\tau + 2T_{onm}) \lambda + 1 \right] e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} = 0, \quad (8.62)$$

для III–закону

$$D'(\lambda) = \left[\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} T_{onm} \lambda^2 + \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} + 2T_{onm} \right] \lambda + 1 \left[e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 k_{\Pi} \right] = 0, \quad (8.63)$$

$$D''(\lambda) = \left[\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{2}{3}} T_{onm} \lambda^2 + \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{2}{3}} + 4 \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} T_{onm} \right] \lambda + 2 \left[\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} + T_{onm} \right] \left[e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}} \right] = 0, \quad (8.64)$$

для ПД–закону

$$D'(\lambda) = \left[\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} T_{onm} \lambda + \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} + T_{onm} \right] e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 k_{\mathcal{D}} = 0, \quad (8.65)$$

$$D''(\lambda) = \left[\left\{ \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}^2 T_{onm} \lambda^2 + \left\{ \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}^2 + 2 \left\{ \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right\} T_{onm} \right] e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}} = 0, \quad (8.66)$$

для ПДД–закону

$$D'(\lambda) = \left[\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} T_{onm} \lambda^2 + \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} + 2T_{onm} \right] \lambda + 1 \left[e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 (k_{\Pi} + 2k_{\mathcal{D}} \lambda) \right] = 0, \quad (8.67)$$

$$D''(\lambda) = \left[\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{2}{3}} T_{onm} \lambda^2 + \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{2}{3}} + 4 \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} T_{onm} \right] \lambda + 2 \left[\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} + T_{onm} \right] \left[e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}} \right] + 2k_0 k_{\mathcal{D}} = 0, \quad (8.68)$$

$$D'''(\lambda) = \left[\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^2 T_{onm} \lambda^2 + \left\{ \left(\frac{x^2}{\pi} \right) + 6 \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{2}{3}} T_{onm} \right\} \lambda + 3 \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{2}{3}} + \left[\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} + T_{onm} \right] \right] e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}} = 0, \quad (8.69)$$

для ПДДД–закону

$$D'(\lambda) = \left[\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} T_{onm} \lambda + \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} + T_{onm} \right] e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 (k_{\text{Д}} + 2k_{\text{Д1}} \lambda) = 0, \quad (8.70)$$

$$D''(\lambda) = \left[\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} T_{onm} \lambda^2 + \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} + 2 \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} T_{onm} \right] e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + 2k_0 k_{\text{Д1}} = 0, \quad (8.71)$$

$$D'''(\lambda) = \left[\left(\frac{x^2}{\pi}\right) T_{onm} \lambda^2 + 3 \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} T_{onm} \right] e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} = 0, \quad (8.72)$$

для ПДД-закону

$$D'(\lambda) = \left[\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} T_{onm} \lambda^2 + \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} + 2T_{onm} \right] \lambda + 1 e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + k_0 (k_{\text{П}} + 2k_{\text{Д}} \lambda + 3k_{\text{Д1}} \lambda^2) = 0, \quad (8.73)$$

$$D''(\lambda) = \left[\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} T_{onm} \lambda^2 + \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} + 4 \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} T_{onm} + 2 \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} + T_{onm} \right] e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + 2k_0 (k_{\text{Д}} + 6k_{\text{Д1}} \lambda) = 0, \quad (8.74)$$

$$D'''(\lambda) = \left[\left(\frac{x^2}{\pi}\right) T_{onm} \lambda^2 + \left[\left(\frac{x^2}{\pi}\right) + 6 \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} T_{onm}\right] \lambda + 3 \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} + 6\tau T_{onm} \right] e^{\lambda \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + 6k_0 k_{\text{Д1}} = 0, \quad (8.75)$$

$$D^{(4)}(\lambda) = \left[\begin{array}{l} (\frac{x^2}{\pi})^{\frac{4}{3}} T_{onm} \lambda^3 + [(\frac{x^2}{\pi})^{\frac{4}{3}} + \\ + 8(\frac{x^2}{\pi}) T_{onm}] \lambda + \\ + 4(\frac{x^2}{\pi}) + 12(\frac{x^2}{\pi})^{\frac{2}{3}} T_{onm} \end{array} \right] e^{\lambda (\frac{x^2}{\pi})^{\frac{1}{3}}} = 0 \quad (8.76)$$

З виражень (8.62), (8.64), (8.66), (8.69), (8.72), (8.76) у результаті заміни λ на $-J$ і прирівнювання нулю виражень, укладених у квадратні дужки, одержуємо співвідношення для максимального ступеня стійкості, наведені в табл. 8.1.

8.4. Синтез закону безпосереднього цифрового керування

Запишемо лінійний безперервний ПД-закон керування в наступному виді

$$u(t) = k_{\Pi} \sum_{i=0}^2 A_i e^{i-1}(t) \quad (8.77)$$

де $e(t) = x_0(t) - y(t)$ – сигнал помилки,

$$A_1 e^1(t) = e(t); \quad A_2 e^2(t) = T_3 de(t)/dt; \quad A_0 e^{-1}(t) = \frac{1}{T_2} \int_0^t e(h) dh$$

Відповідний йому цифровий закон керування має вигляд

$$u[nT] = k_{\Pi} e[nT] + \frac{k_{\Pi} T}{T_2} \sum_{i=1}^n e(iT) + \frac{k_{\Pi} T_3}{T} [e[nT] - e[(n-1)T]] \quad (8.78)$$

Таблиця 8.1
Вираження для параметрів настроювання регуляторів

Вид закону керування	Вираження для критерію максимального ступеня стійкості	Вираження для параметрів настроювання регулятора
1	2	3
I	$J_{II} = \frac{1}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + \frac{1}{2T_{онм}}$ $- \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}}} + \frac{1}{4T_{онм}^2}}$	$k_{II} = \frac{1}{k_0} (1 - T_{онм} J_{II}) J_{II} e^{-\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} J_{II}}$
III	$J_{III} = \frac{2}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + \frac{1}{2T_{онм}}$ $- \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}}} + \frac{1}{4T_{онм}^2}}$	$k_{III} = \frac{1}{k_0} \left\{ \left[\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} + 2T_{онм} \right] J_{III} - \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} T_{онм}^2 J_{III}^2 - 1 \right\} e^{-\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} J_{III}}$

Продовження табл. 8.1

1	2	3
		$k_{II} = \frac{1}{k_0} \left\{ \left[\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} + T_{opt} \right] - \right.$ $\left. - \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} T_{opt} J_{PII} \right\}^*$ $* J_{PII}^2 e^{-\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} J_{PII}}$
ПД	$J_{ПД} = \frac{2}{\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}} + \frac{1}{T_{opt}}$	$k_{Д} = \frac{T_{opt}}{k_0} e^{-\frac{\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}}{T_{opt}} - 2}$ $k_{П} = \frac{1}{k_0} \frac{4T_{opt}}{\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}} (1 + 1) e^{-\frac{\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}}{T_{opt}} - 2}$
ПД	$J_{ПД} = \frac{2}{\frac{2}{x} \frac{1}{\pi}} + \frac{1}{2T_{opt}} -$ $- \sqrt{\frac{1}{\left\{ \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}^2} + \frac{1}{4T_{opt}^2}}$	$k_{Д} = \frac{1}{2k_0} \left\{ \left[\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^2 (J_{ПД} - T_{opt} J_{ПД}^2) - \right.$ $\left. - 2 \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} (1 - 2T_{opt} J_{ПД}) - \right.$ $\left. - 2T_{opt} \right\} e^{-\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} J_{ПД}}$

Продовження табл. 8.1

1	2	3
		$ \begin{aligned} k_{II} &= \frac{1}{k_0} \left[\left\{ \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}^2 \Gamma_{opt} J_{PIID}^3 + \right. \\ &+ \left. \left(\left\{ \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}^2 + 3 \left\{ \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right\} \Gamma_{opt} \right) J_{PIID}^2 - \right. \\ &- \left. \left\{ \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right\} J_{PIID} - 1 \right] e^{-\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} J_{PIID}} \\ k_{II} &= \frac{1}{k_0} \left[\left\{ \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}^2 \Gamma_{opt} J_{PIID}^4 + \right. \\ &+ \left. \left(\left\{ \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right\}^2 + 2 \left\{ \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \right\} \Gamma_{opt} \right) J_{PIID}^3 + \right. \\ &+ \left. 4 \Gamma_{opt} J_{PIID}^2 + 4 J_{PIID} \right] e^{-\left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} J_{PIID}} \end{aligned} $

Продовження табл. 8.1

ПДД	$J_{ПДД} = \frac{2}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + \frac{1}{T_{онм}}$	$k_{Д1} = \frac{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot T_{онм}}{2k_0} e^{-\frac{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}}{T_{онм}} - 3}$ $k_{Д} = \frac{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} + 5T_{онм}}{k_0} e^{-\frac{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}}{T_{онм}} - 3}$ $k_{П} = \frac{1}{k_0} \left(\frac{27}{2} \cdot \frac{T_{онм}}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + \frac{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}}{T_{онм}} - 3 \right) e^{-\frac{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}}{T_{онм}} - 3}$
-----	--	--

Рівнянню безперервного ПІД-регулятора (8.77) відповідає передатна функція у вигляді z-перетворення

$$D(z) = k_{II} \left[1 + \frac{T}{T_{II}(1-z^{-1})} + \frac{T_D(1-z^{-1})}{T} \right]. \quad (8.79)$$

Якщо стала часу диференціювання $T_D=0$, то для цифрового ПІ-регулятора маємо

$$D(z) = k_{II} \left[1 + \frac{T}{T_{II}(1-z^{-1})} \right]. \quad (8.80)$$

Якщо до обох частин рівняння (8.78) застосувати операцію взяття різниці першого порядку, то в результаті одержимо ПІД-закон регулювання у вигляді

$$\begin{aligned} u[nT] - u[(n-1)T] &= k_{II} \{e[nT] - e[(n-1)T]\} + \frac{k_{II}T}{T_{II}} e[nT] + \\ &+ \frac{k_{II}T_D}{T} \{e[nT] - 2e[(n-1)T] + e[(n-2)T]\}, \end{aligned} \quad (8.81)$$

який можна перетворити до виду, зручного для програмної реалізації:

$$u[nT] = u[(n-1)T] + A_0 e[nT] + A_1 e[(n-1)T] + A_2 e[(n-2)T], \quad (8.82)$$

де

$$\begin{aligned} A_0 &= k_{II} \left[1 + \frac{T}{T_{II}} + \frac{T_D}{T} \right], \\ A_1 &= -k_{II} \left[1 + \frac{2T_D}{T} \right], \\ A_2 &= \frac{k_{II}T_D}{T}. \end{aligned}$$

Для цифрового ПІ-закону керування коефіцієнти приймають наступні значення

$$\begin{aligned} A_0 &= k_{II} \left[1 + \frac{T}{T_{II}} \right], \\ A_1 &= -k_{II}, \end{aligned}$$

$$A_2 = 0.$$

При цифровій реалізації адаптивних регуляторів виникає завдання визначення максимально припустимого періоду квантування T , при якому забезпечується задана точність наближення цифрового закону керування до свого безперервного аналога. Вибір T виконаємо з використанням максимального ступеня стійкості J_{opt} [90].

У випадку ПД–закону регулювання для об'єкта (8.52) маємо

$$T \leq \frac{4.46e}{J_{opt}}, \quad (8.97)$$

а для ПІ–закону регулювання

$$T \leq \frac{3.69e}{J_{opt}}. \quad (8.98)$$

Таким чином, використавши співвідношення для J_{opt} , з табл. 8.1 одержимо залежності максимально припустимого періоду квантування від параметрів об'єкта керування, адаптивного фільтра T_{opt} і еквівалентного запізнювання $\tau(x)$

для ПД–закону керування

$$T \leq \frac{4.46e}{\frac{3}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} - \frac{2}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}}} + \frac{1}{4T_{opt}^2}}. \quad (8.99)$$

і для ПІ–закону керування

$$T \leq \frac{3.69e}{\frac{2}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + \frac{1}{2T_{opt}} - \frac{2}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}}} + \frac{1}{4T_{opt}^2}}. \quad (8.100)$$

8.5. Дослідження адаптивних контурів керування

На рис.8.1 показано запропоновану узагальнену структуру моделі контуру керування швидкістю РО. Сукупність вхідних сигналів, які використовуються при моделюванні, формується базою даних та сигналів 1. Ці сигнали обробляються адаптивним фільтром 2 [92] стала часу якого визначається блоком настроювання фільтру 7. Сигнал з виходу фільтру 2 подається на адаптивний регулятор 3 [195] з блоком настроювання регулятора 8. Останній використовує сигнали з бази даних та сигналів 1, а також з моделі РО, яка містить еквівалентне запізнювання 5 та інерційну ланку 6. В моделі також передбачено формування різних збурень. Зворотний зв'язок організовано за сигналом швидкості, який знімається з точки поточної координати x . База даних та сигналів містить наступні сигнали.

Корисний сигнал

- східчастий сигнал завдання швидкості $1(t)$, період 5; 10 у.о.;
- синусоїдальний сигнал завдання швидкості.

Завади

- синусоїдальний сигнал $A\sin\omega t$, $\omega=10-1000$ рад/у.о.;
- випадковий сигнал: потужність 0.001, період 0.01 у.о., початкове значення генератора випадкових чисел (seed) 23341.

Збурення

- випрямлений синусоїдальний сигнал; період 5 у.о.;
- випадковий сигнал: амплітуда 0.02, період формування 0.1 у.о., початкове значення генератора випадкових чисел (seed) 23341.

Параметри настроювання контуру керування

запізнювання τ , $\tau_{au}=0,01 - 0,25$ у.о.;

- коефіцієнти підсилення 0 – 100;

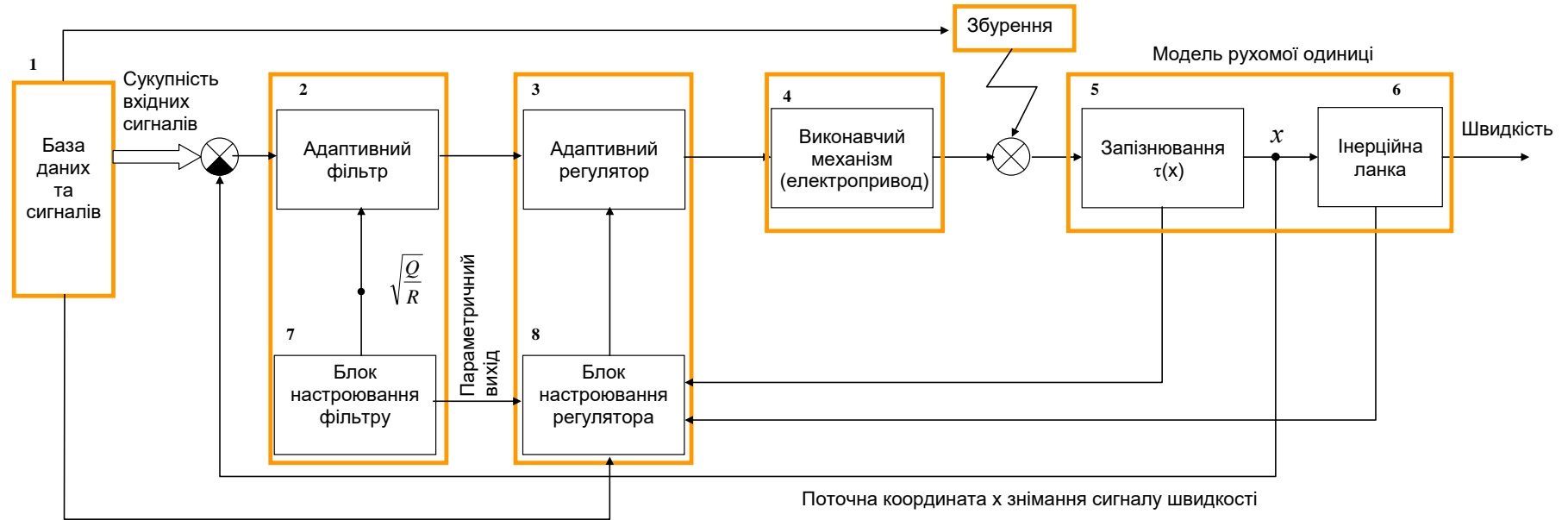


Рис.8.1. Структура КК РО із еквівалентним запізнюванням і ПІ—регулятором

- діапазон зміни k_{II} 0.01 – 20;
- діапазон зміни k_{II} 0.01 – 20;
- сталі часу 0.01-1 у.о.;
- частота сполучення фільтру $\omega_{comp} = 1-50$ рад/у.о..

Нижче наведено результати моделювання адаптивного КК. Структура розробленої Simulink – моделі контуру керування швидкістю РО наведена на рис.8.2. Сукупність вхідних сигналів, які використовуються при моделюванні, формується базою даних (рис.8.1). Обчислення сталої часу фільтру T_ϕ здійснюється за формулами

$$W_\phi(p) = \frac{1}{T_\phi s + 1}, \text{ де}$$

$$T_\phi = T_{opt} = T_\beta \sqrt{\frac{Q}{R + \Delta}}$$

(Δ – мала константа, що виключає ділення на нуль).

Обчислення критерію КМСС та параметрів настроювання регулятора виконуються відповідними блоками моделі.

При дослідженні динамічних властивостей КК використано ПІ-регулятор, у припущенні, що параметри об'єкта керування, фільтра й оцінки характеристик випадкових корисних сигналів і завад у процесі експлуатації міняються в широких границях.

Нижче отримані аналітичні залежності між параметрами об'єкта, адаптивного фільтра й параметрами настроювання ПІ-регулятора, які використовуються у моделі.

Досліджується замкнутий КК (рис. 8.1) для випадку, коли модель НБЧ контуру керування з урахуванням екстраполятора, описується інтегруючою ланкою з еквівалентним запізнюванням. Для даного випадку передатна функція замкнутого КК має вигляд

$$W_3(s) = \frac{k_0 k_{II} s + k_0 k_{II}}{se^{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} (T_{opt} s + 1) + k_0 k_{II} s + k_0 k_{II}} \quad (8.101)$$

Згідно табл. 8.1:

КМСС дорівнює

$$J_{ПИ} = \frac{2}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}}} + \frac{1}{2T_{opt}} - \left[\frac{1}{\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}}} + \frac{1}{4T_{opt}} \right]^{\frac{1}{2}},$$

оптимальні параметри настроювання ПІ– регулятора

$$k_{Пopt} = \frac{1}{k_0} \left[\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} + 2T_{opt} J_{ПИ} - \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} T_{opt} J_{ПИ}^2 - 1 \right] e^{-\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} J_{ПИ}}$$

$$k_{Иopt} = \frac{1}{k_0} \left[\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} + T_{opt} - \left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} T_{opt} J_{ПИ} \right] J_{ПИ}^2 e^{-\left(\frac{x^2}{\pi}\right)^{\frac{1}{3}} J_{ПИ}},$$

а еквівалентна оптимальна передатна функція замкнутого КК дорівнює

$$W_{зз}(q) = \frac{k_{Пopt} s + k_{Иopt}}{(s + J_{opt})^3}.$$

Аналіз цієї передатної функції показує, що адаптація КК у перехідних процесах при будь-яких змінах параметрів РО і завад забезпечує перехідний процес, близький до аперіодичного.

Дослідження КК виконано при різних сигналах на його вході, які являють собою адитивну сукупність корисного сигналу $s(t)$ та завади $\xi(t)$

$$u(t) = s(t) + \xi(t).$$

У якості корисного сигналу обрано прямокутний сигнал з одиничною амплітудою і періодом 10 умовних (машинних) одиниць, який широко використовується у аналогічних дослідженнях [29, 90].

Сигнал завади обрано (не обмежуючи загальності) у вигляді синусоїди з більш високою частотою в порівнянні з корисним сигналом та у вигляді випадкових збурюючих сигналів. Відповідні графіки сигналів показані на рис. 8.3 – рис. 8.18 (на всіх рисунках область допустимої зміни регульованої величини показана рожевим кольором).

Аналіз отриманих графіків перехідних процесів показує наступне.

Після оптимального вибору параметрів настроювання контури з адаптацією (рис.8.4) та без адаптації (рис.8.5) забезпечують високу якість процесів керування. Зміна коефіцієнта передачі об'єкта керування з 1 до 10 призводить до нестійкої роботи контуру керування без адаптації (рис.8.6) – контур перестає номально функціонувати. КК з адаптацією забезпечує туж саму якість процесу керування (процеси на рис.8.4 та рис.8.7 однакові, видно, що в процесі адаптації змінилися параметри настроювання регулятора: для k_D з 0,65 на 6,5, а для k_I з 5,5 на 0,52).

При збільшенні запізнювання з 0,01 до 0,07 у.о. контур без адаптації не має необхідної якості процесу керування, а контур з адаптацією компенсує зміну запізнювання, забезпечуючи потрібну якість процесу керування (рис.8.7-рис.8.9).

При наявності завад КК з адаптацією дозволяють отримати більш якісні процеси керування у порівнянні з КК без адаптації (рис.8.13 – рис.8.18). Видно, що за рахунок *динамічної адаптації* значно покращується якість процесів керування-відхилення регульованої величини у контурах з адаптацією менше на порядок.

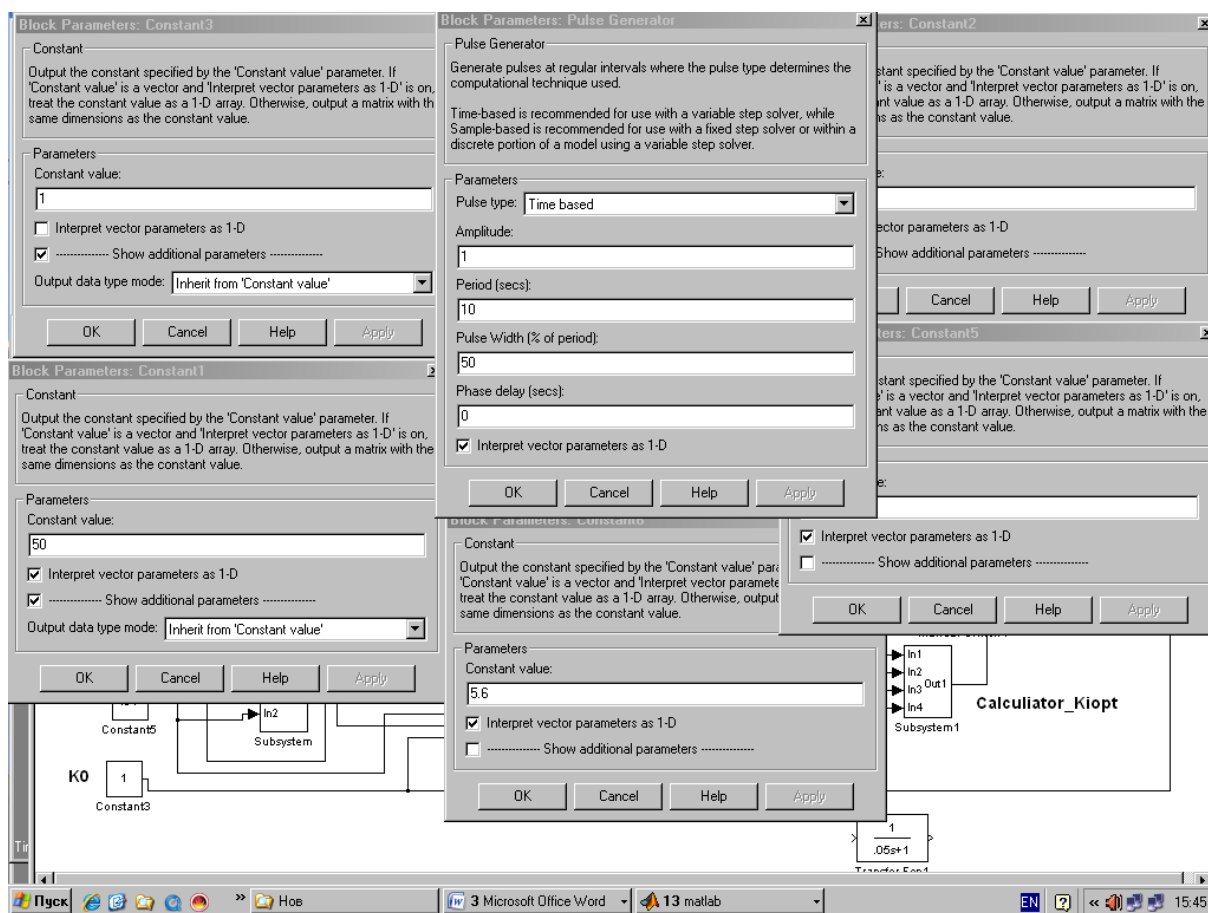
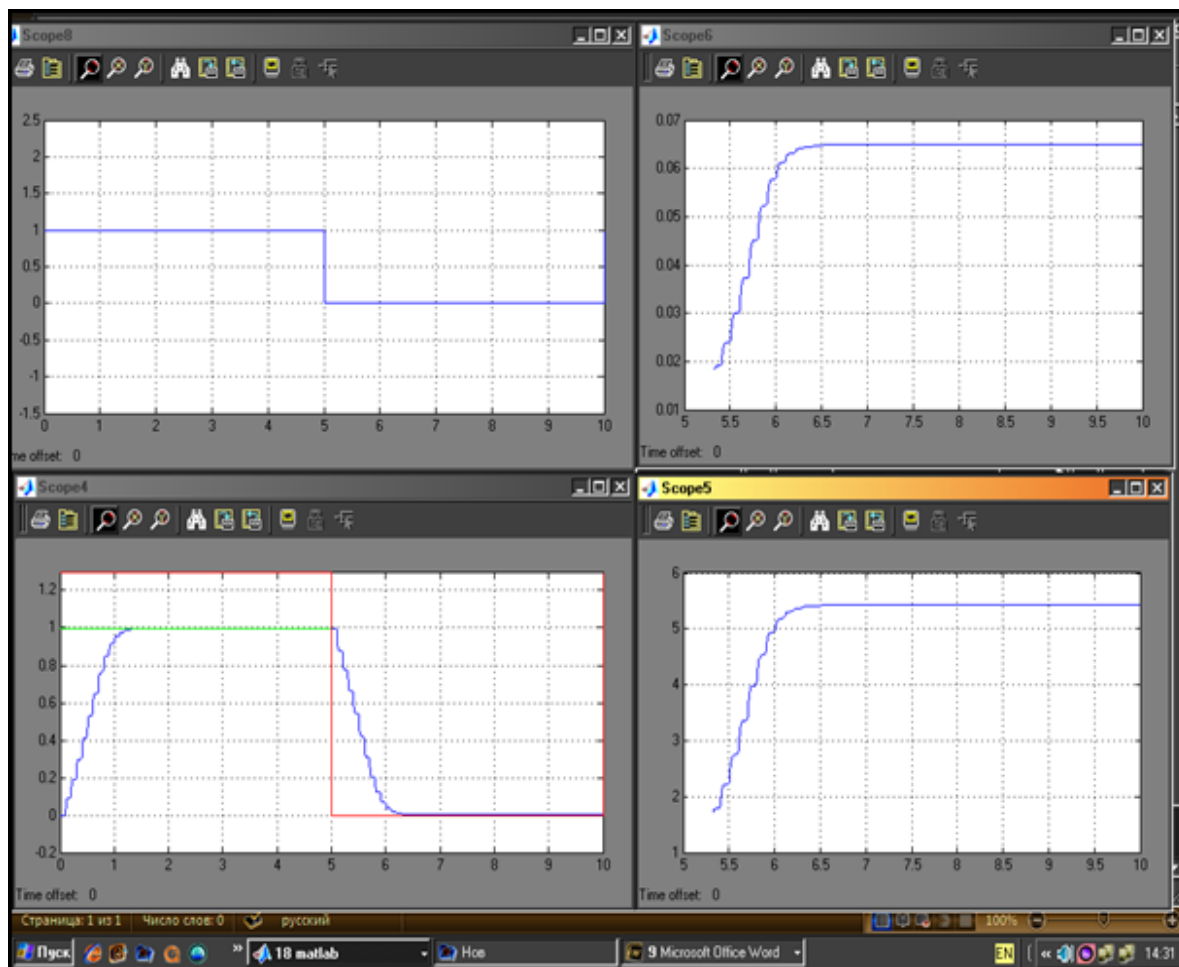


Рис. 8.3. Меню настроювання параметрів КК

а)

в)



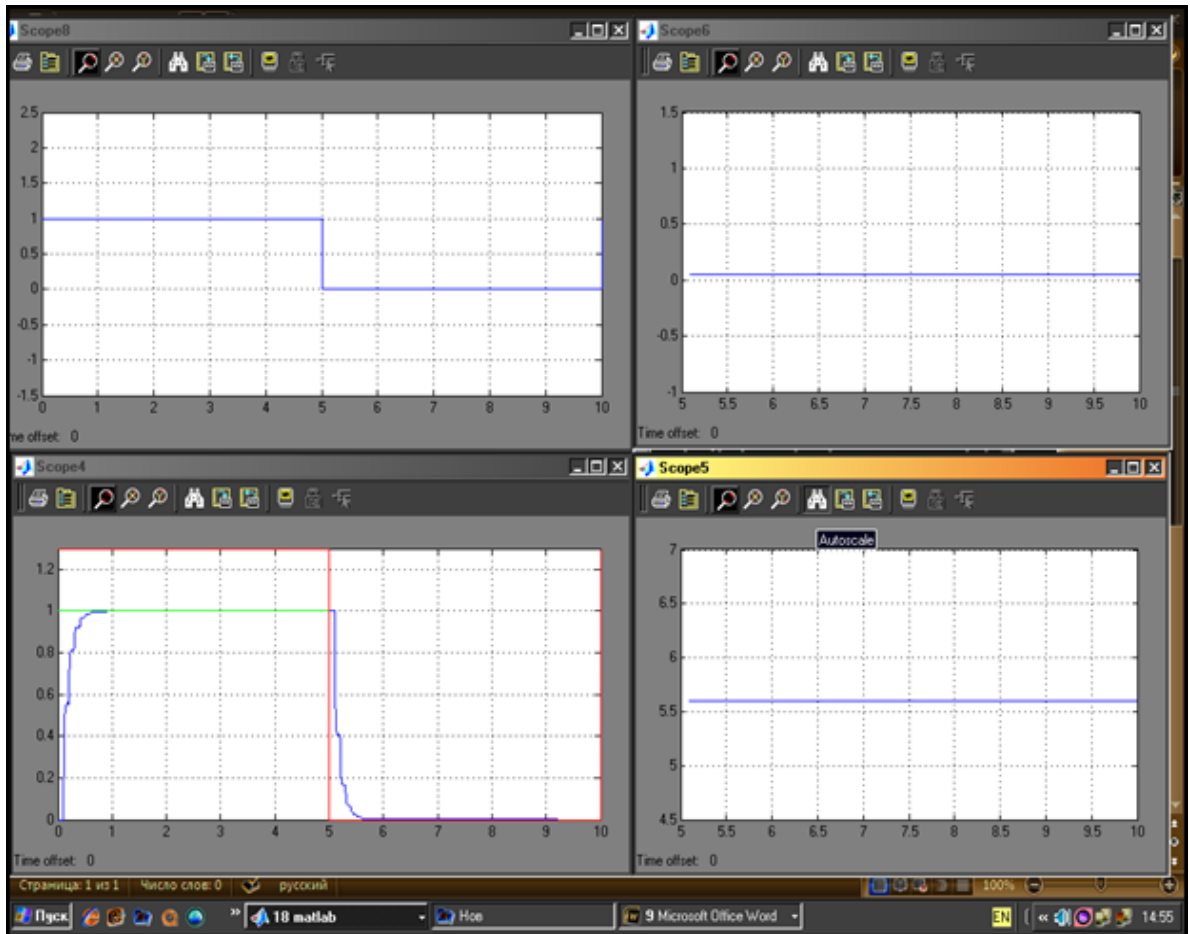
б)

г)

Рис. 8.4. Сигналы у КК з адаптацією: а) вхідний східчастий сигнал $1(t)$, період 10 у.о.; б) вихідний сигнал КК; в) сигнал адаптації k_D ; г) сигнал адаптації k_H ; $\zeta(t)=0$; $\omega_{comp}=50$ рад/у.о.; $\tau=0.01$ у.о.; $K_0=1$

а)

в)



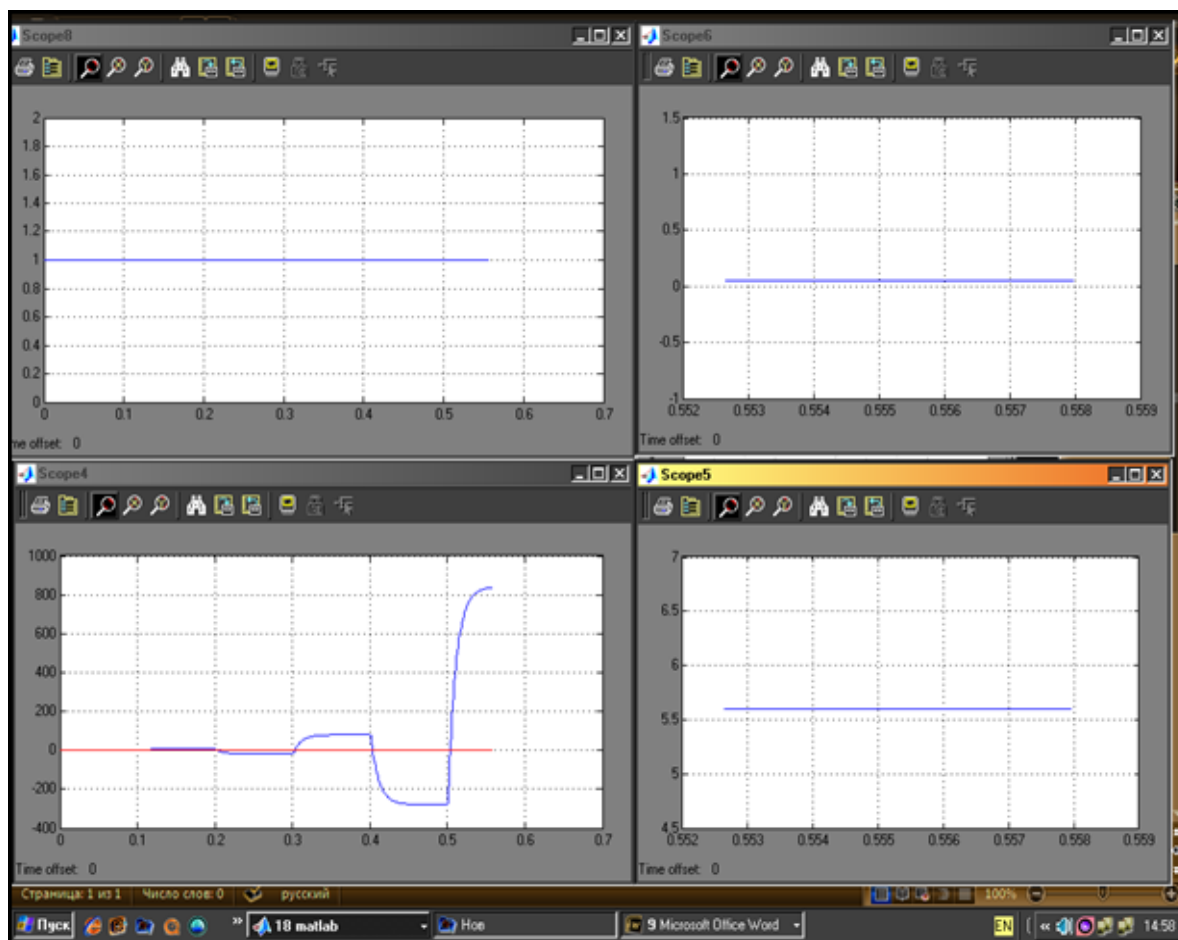
б)

г)

Рис. 8.5. Сигнали у КК без адаптації: а) вхідний східчастий сигнал $1(t)$; б) вихідний сигнал КК; в) $k_{II}=0.05$; г) $k_{II}=5.6$; $\zeta(t)=0$; $\omega_{conp}=50$ рад/у.о.; $\tau=0.01$ у.о.; $K_0=1$

а)

в)



б)

г)

Рис. 8.6. Сигнали у КК без адаптації: а) вхідний східчастий сигнал $1(t)$; б) вихідний сигнал КК; в) $k_{II}=0.05$; г) $k_{II}=5.6$; $\zeta(t)=0$; $\omega_{comp}=50$ рад/ у.о.; $\tau=0.01$ у.о.; $K_0=10$

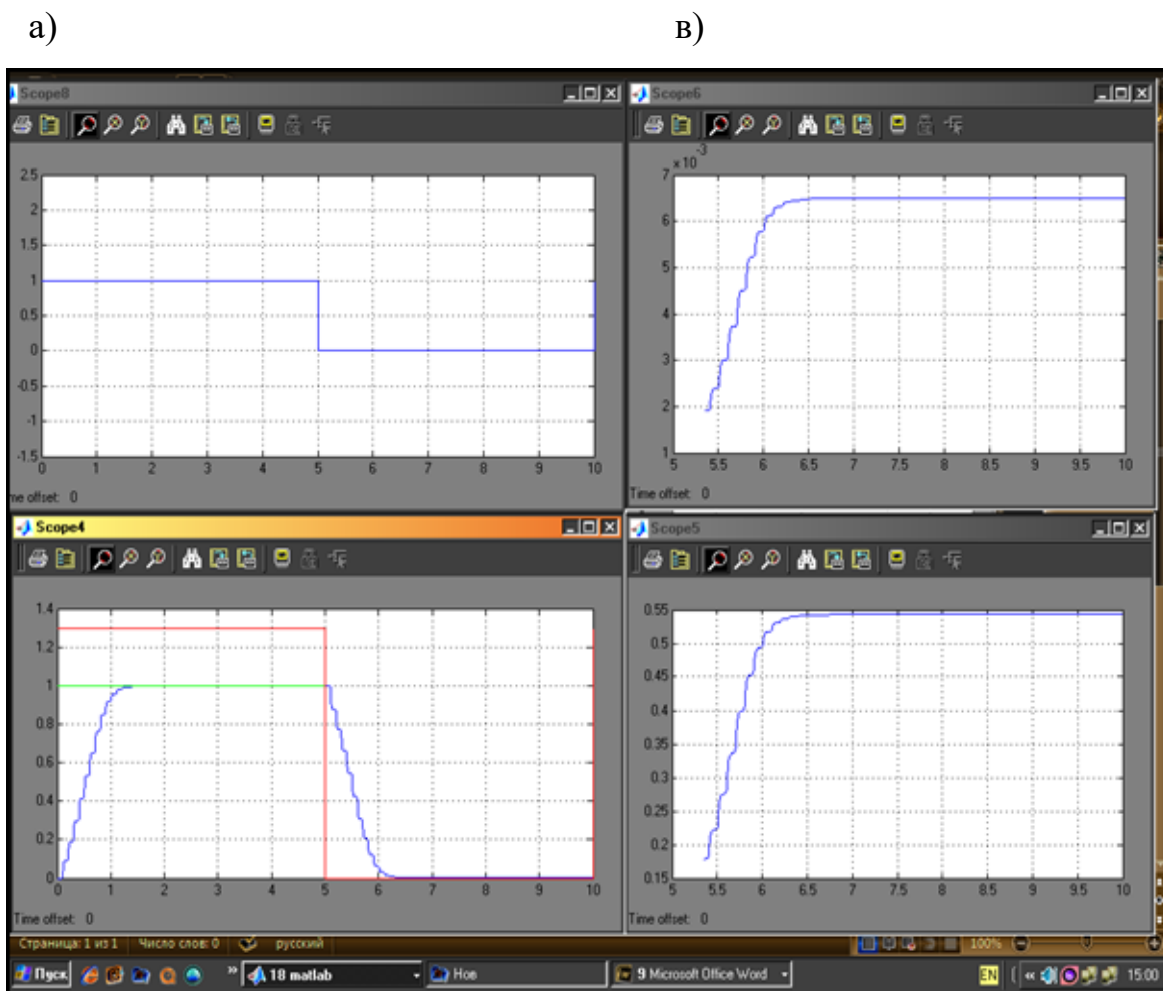


Рис. 8.7. Сигнали у КК з адаптацією: а) вхідний східчастий сигнал $1(t)$; б) вихідний сигнал КК; в) сигнал адаптації k_H ; г) сигнал адаптації k_I ;

$$\zeta(t)=0; \omega_{comp}=50 \text{ рад/ у.о.}; \tau=0.01 \text{ у.о.}; K_0=10$$

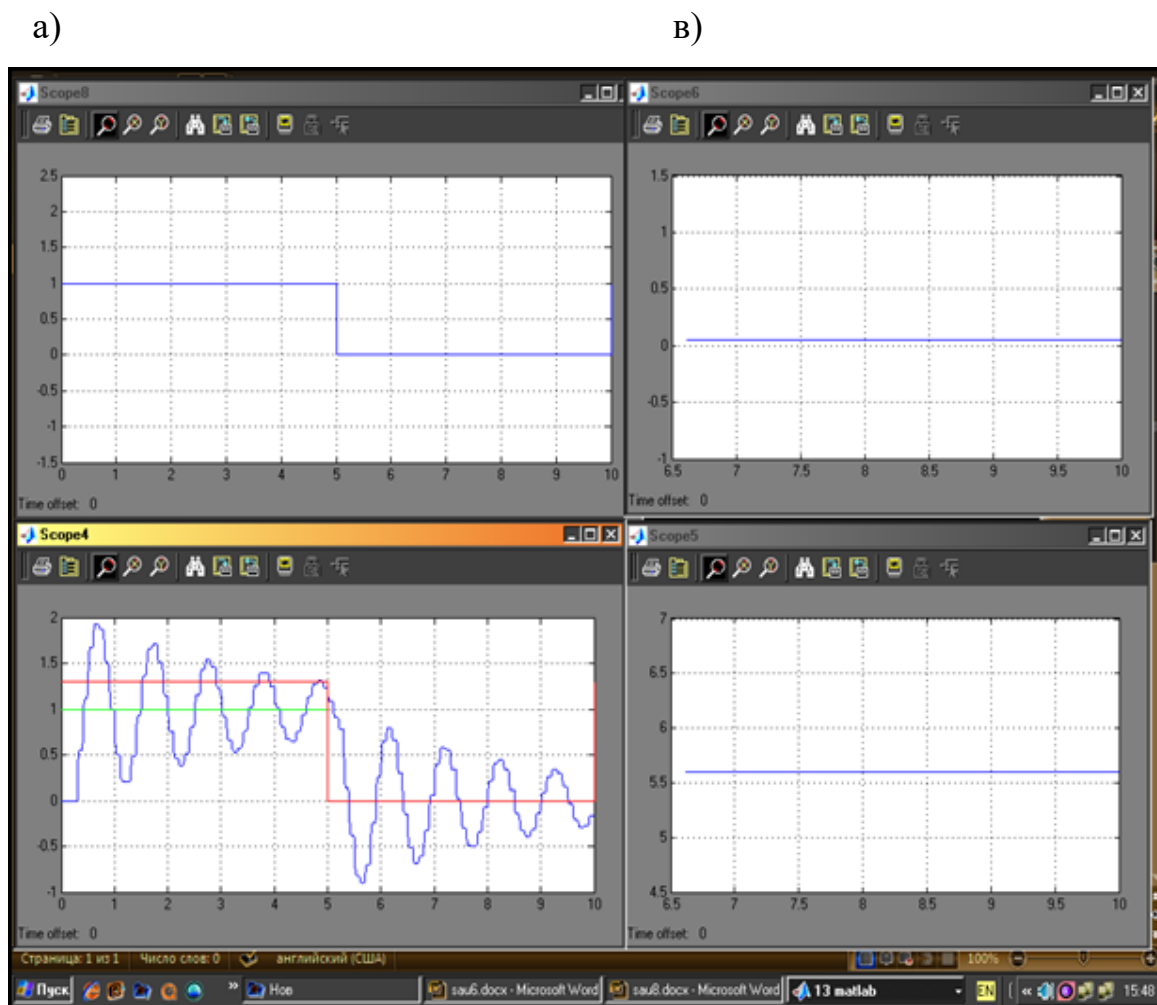
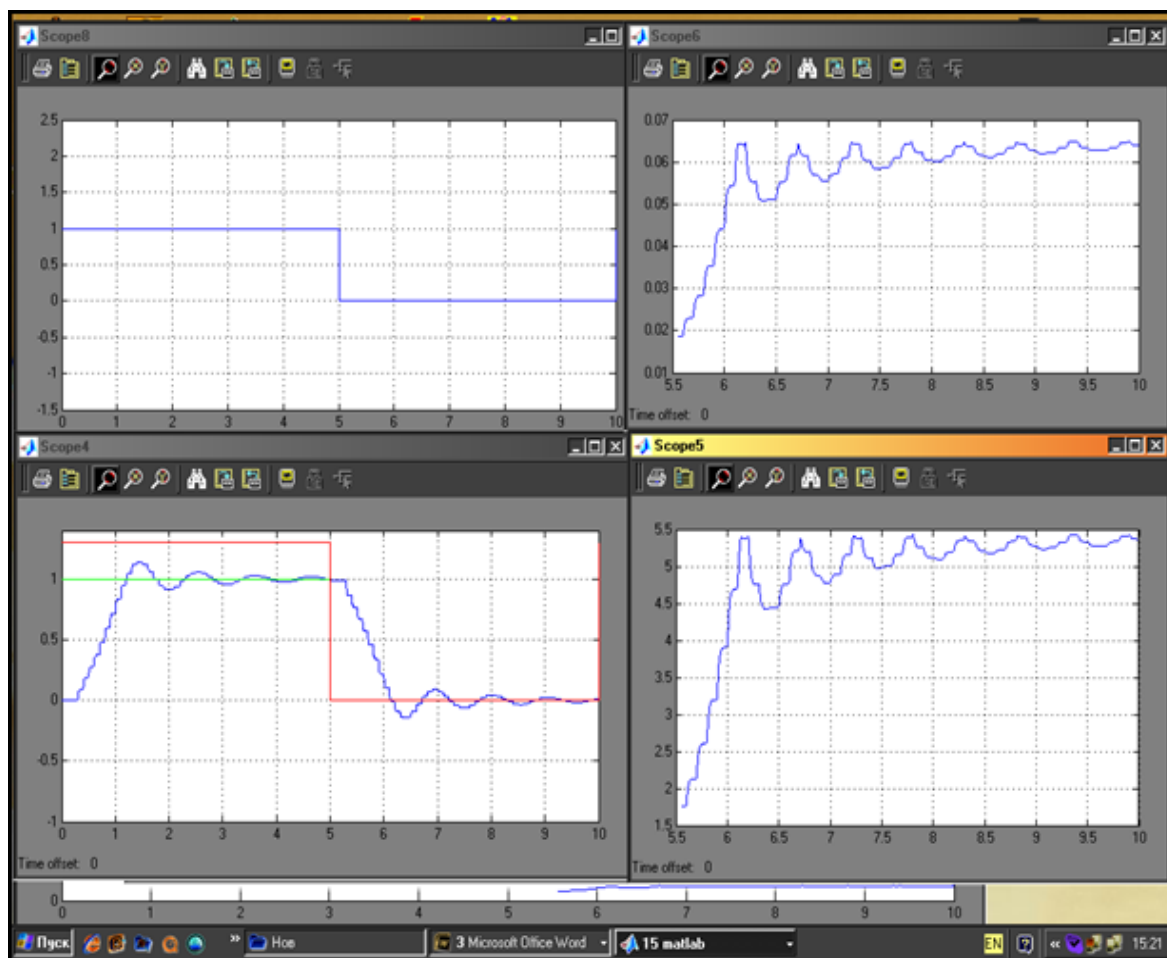


Рис. 8.8. Сигнали у КК без адаптації: а) вхідний східчастий сигнал $1(t)$; б) вихідний сигнал КК; в) $k_{II}=0.05$; г) $k_{II}=5.6$; $\zeta(t)=0$; $\omega_{comp}=50$ рад/ у.о.; $\tau=0.07$ у.о.; $K_0=1$

а)

в)



б)

г)

Рис. 8.9. Сигнали у КК з адаптацією: а) вхідний східчастий сигнал $1(t)$;

б) вихідний сигнал КК; в) $k_H(t)$; г) $k_H(t)$; $\zeta(t)=0$; $\omega_{comp}=50$ рад/ у.о.;

$\tau=0.07$ у.о.; $K_0=1$

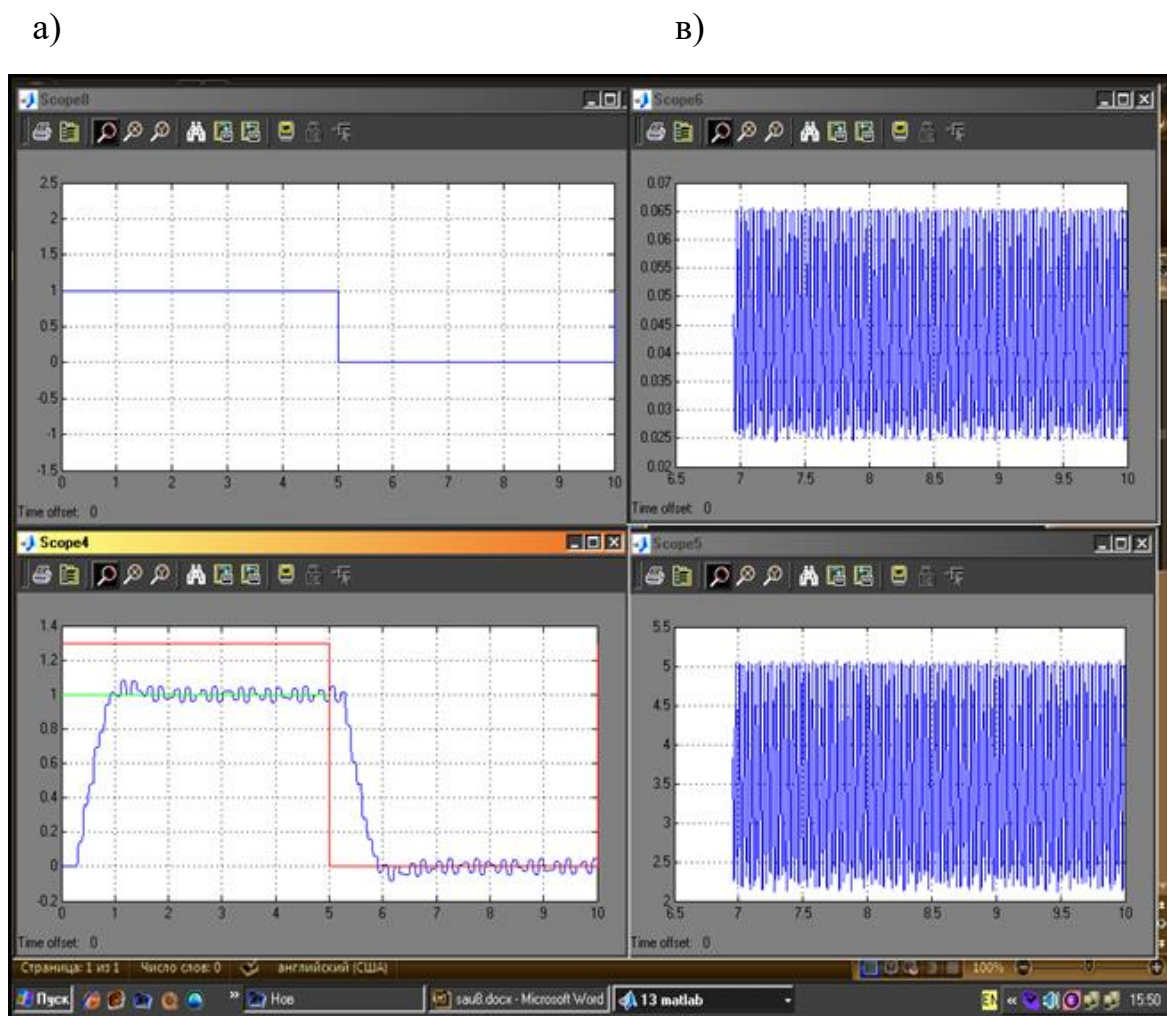
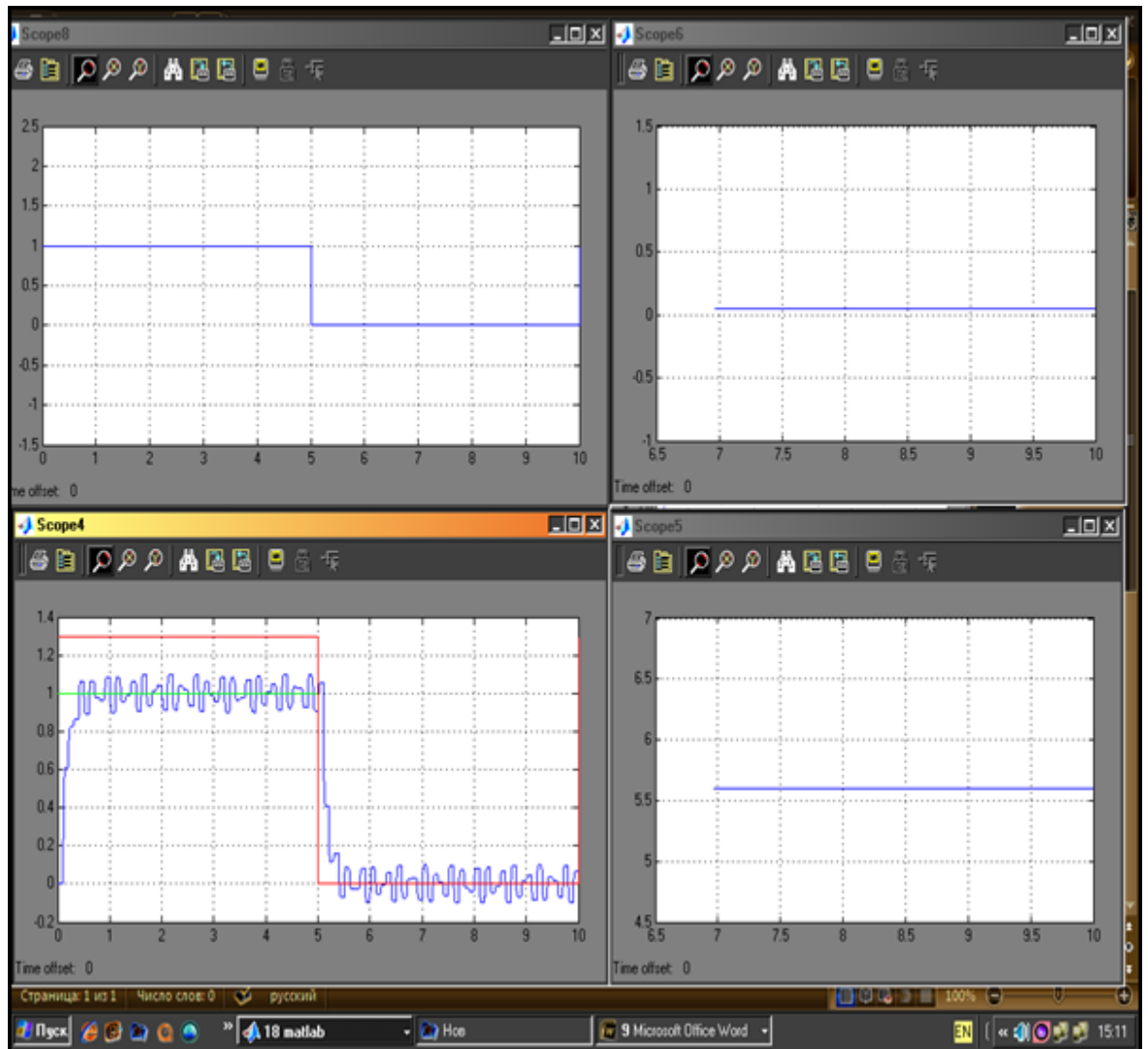


Рис. 8.10. Сигнали у КК з адаптацією: а) вхідний східчастий сигнал $l(t)$; б) вихідний сигнал КК; в) $k_H(t)$; г) $k_H(t)$; $\zeta(t)=1\sin 100t$; $\omega_{comp}=50$ рад/ у.о.; $\tau=0.07$ у.о.; $K_0=1$

а)

в)



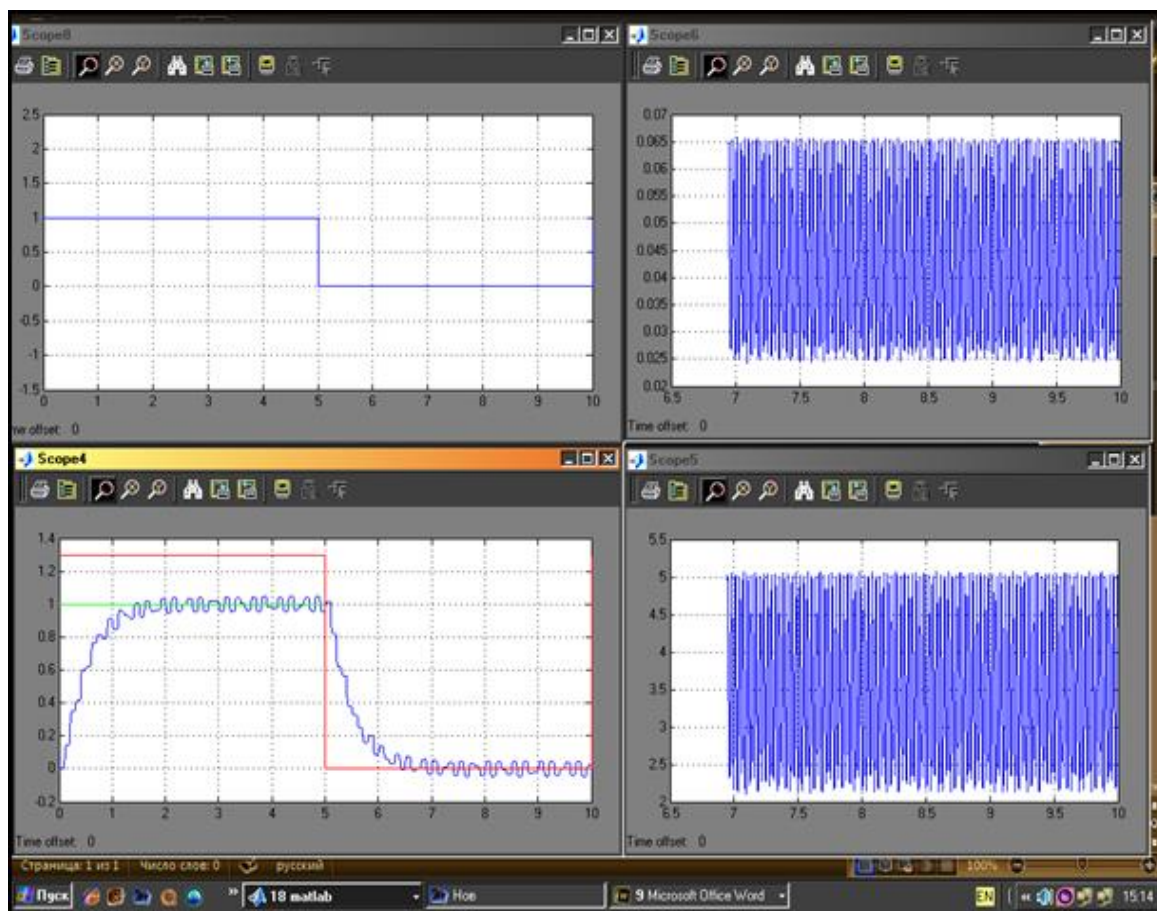
б)

г)

Рис. 8.11. Сигналы у КК без адаптации: а) входний сдвигательный сигнал $1(t)$; б) выходний сигнал КК; в) $k_{II}=0.05$; г) $k_{II}=5.6$; $\zeta(t)=1\sin 100t$; $\omega_{comp}=50$ рад/у.о.; $\tau=0.01$ у.о.; $K_0=1$

а)

в)



б)

г)

Рис. 8.12. Сигналы у КК з адаптацією: а) вхідний східчастий сигнал $1(t)$; б) вихідний сигнал КК; в) $k_{II}(t)$; г) $k_{II}(t)$; $\zeta(t)=1\sin 100t$; $\omega_{comp}=50$ рад/ у.о.; $\tau=0.01$ у.о.; $K_0=1$

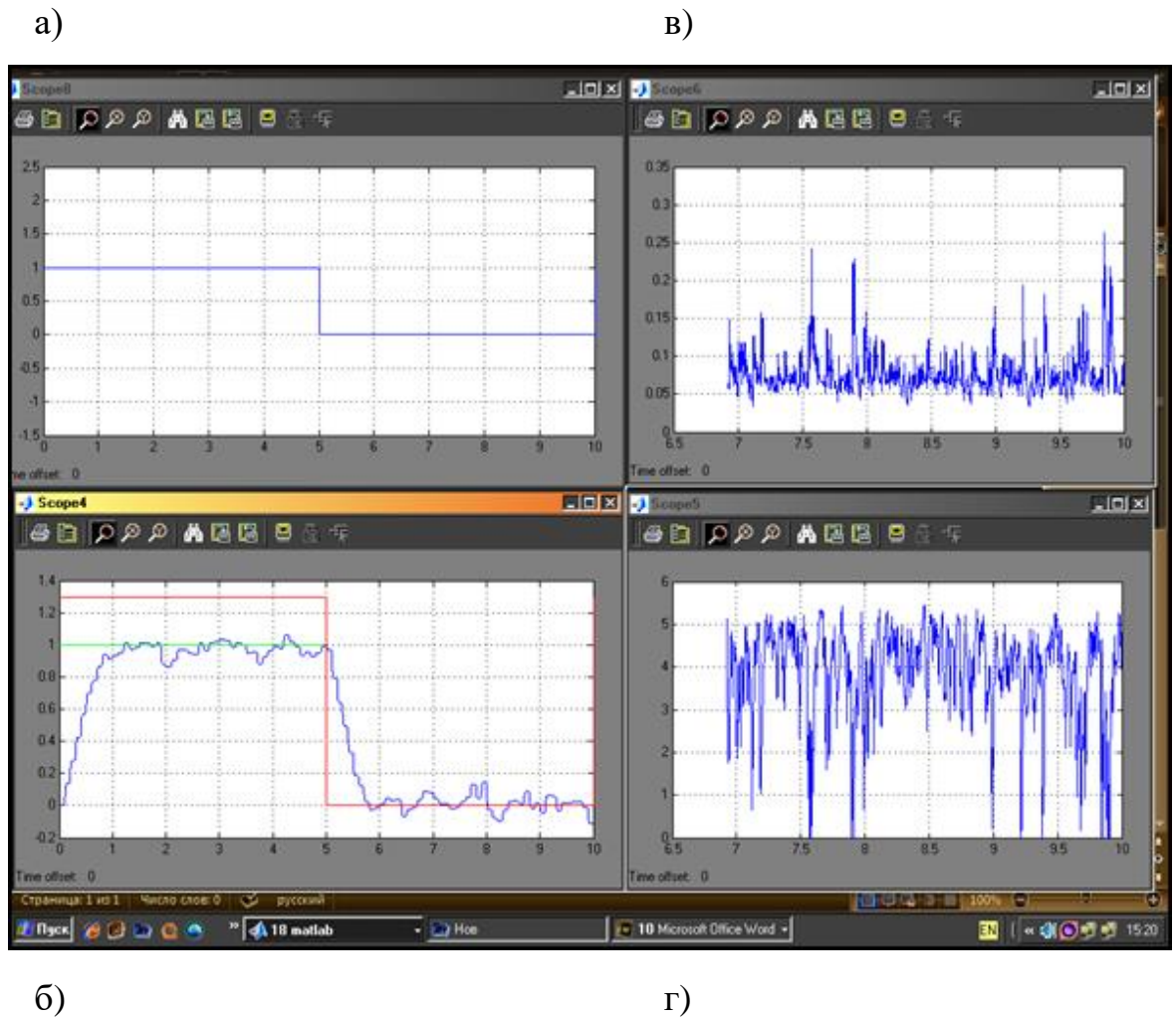


Рис. 8.13. Сигнали у КК з адаптацією: а) вхідний східчастий сигнал $1(t)$; б) вихідний сигнал КК; в) $k_D(t)$; г) $k_D(t)$; $\zeta(t)$ - параметри завади у відповідності до рис.8.14; $\omega_{comp}=50$ рад/ у.о.; $\tau=0.01$ у.о.; $K_0=1$

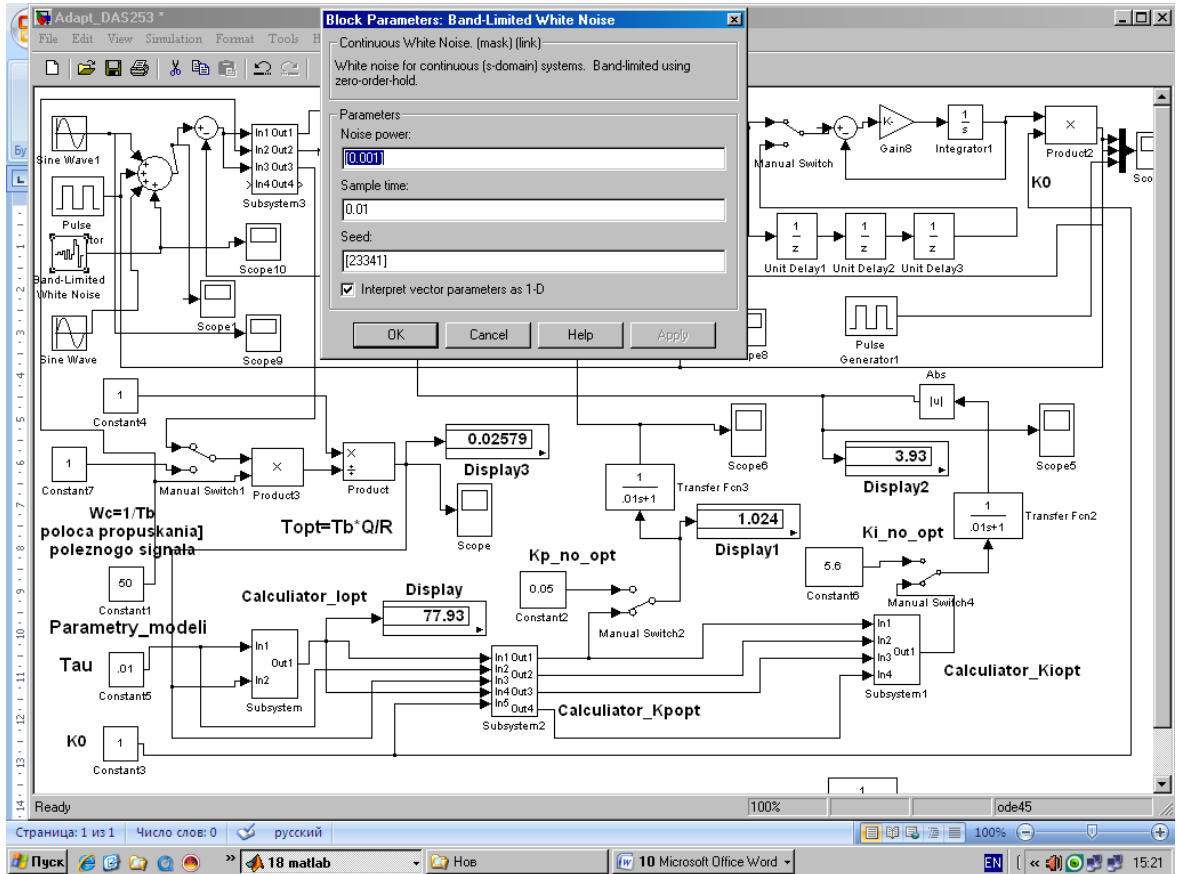
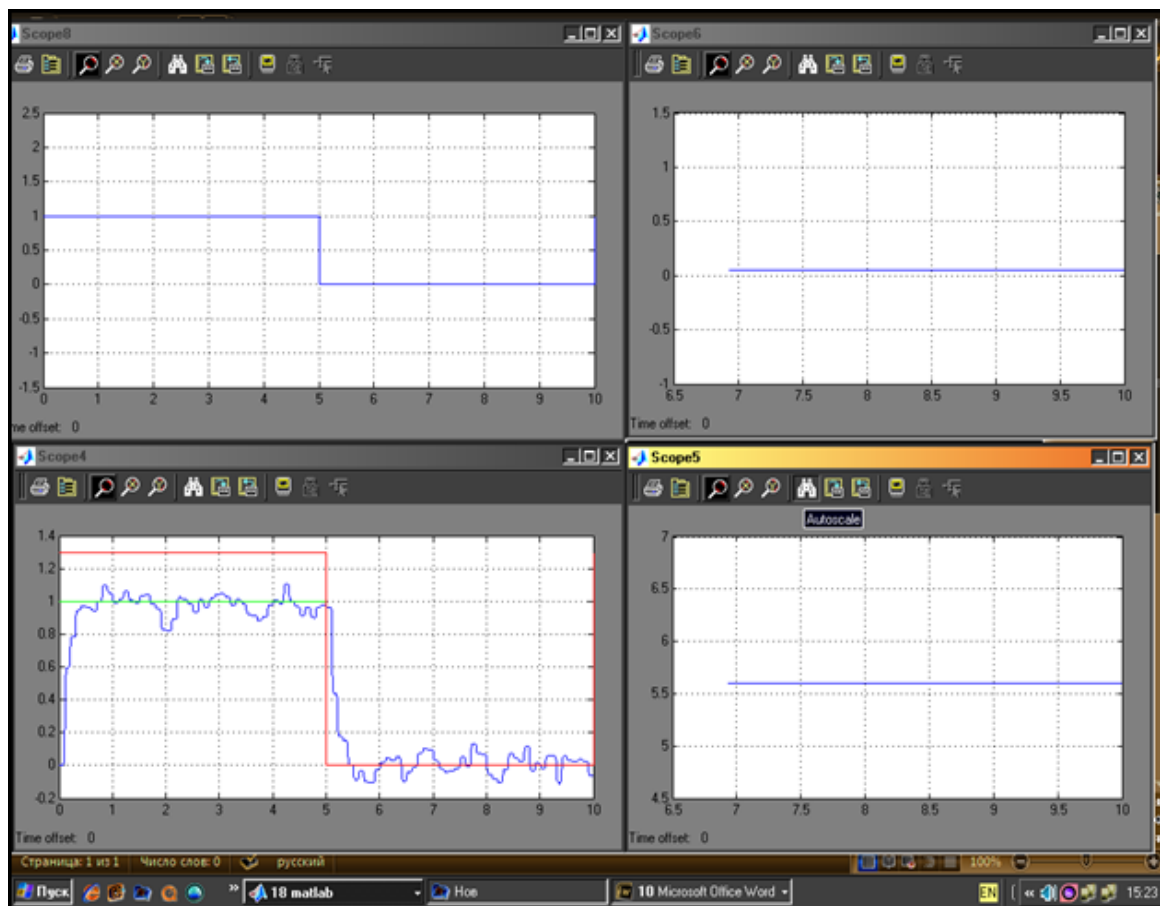


Рис. 8.14. Параметры заводи до рис.8.13, рис. 8.15

а)

в)



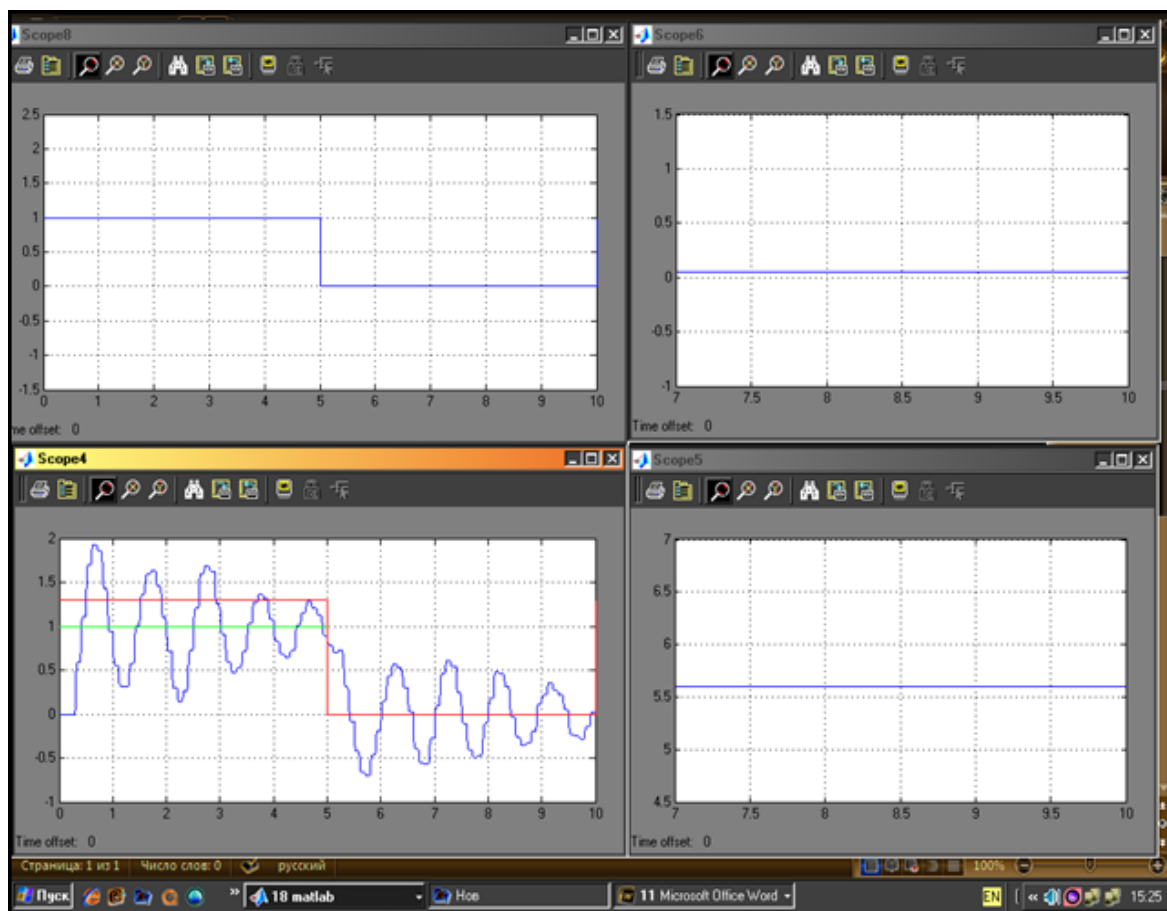
б)

г)

Рис. 8.15. Сигнали у КК без адаптації: а) вхідний східчастий сигнал $1(t)$; б) вихідний сигнал КК; в) $k_{II}(t)$; г) $k_{II}(t)$; $\xi(t)$ - параметри завади у відповідності до рис.8.14; $\omega_{comp}=50$ рад/ у.о.; $\tau=0.01$ у.о.; $K_0=1$ (модельовання виконано при включеному адаптивному фільтрі)

а)

б)



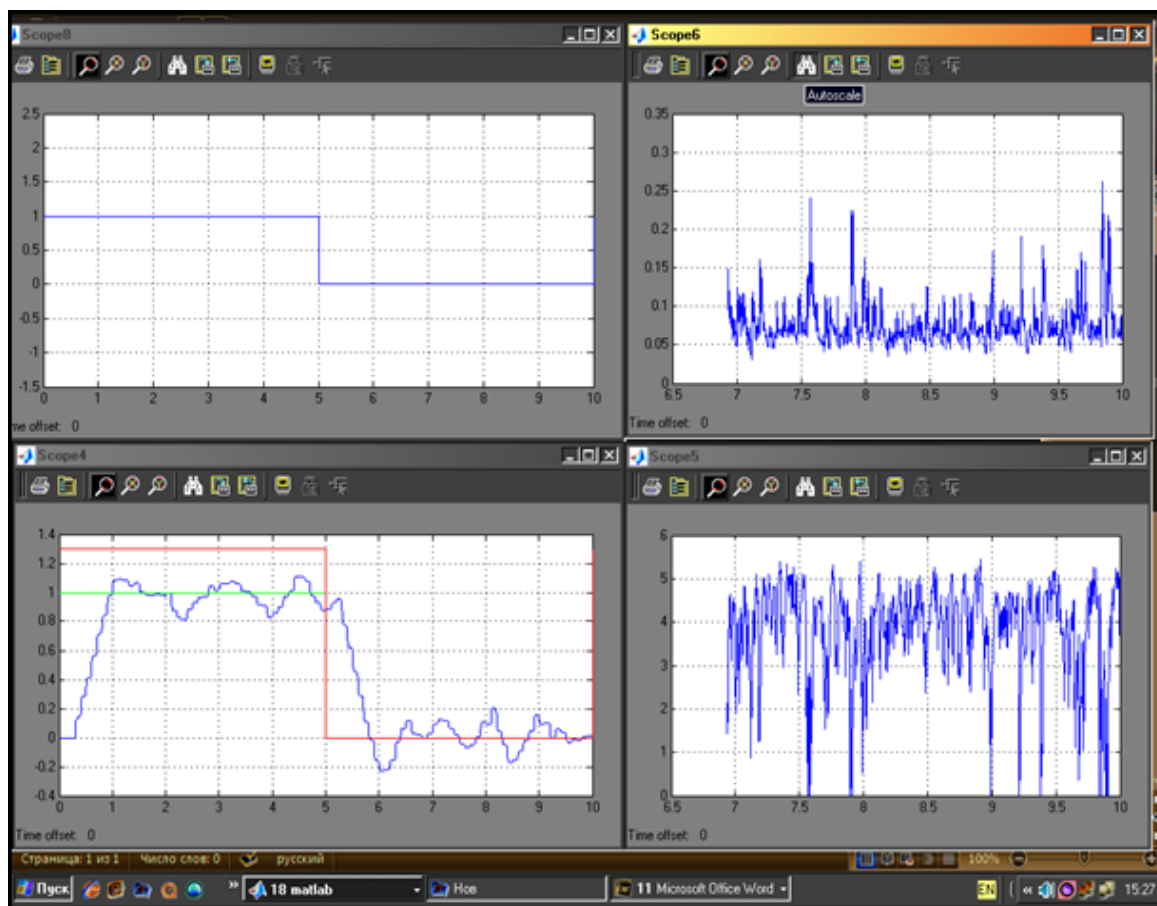
б)

г)

Рис. 8.16. Сигнали у КК без адаптації: а) вхідний східчастий сигнал $1(t)$; б) вихідний сигнал КК; в) $k_{II}(t)$; г) $k_{II}(t)$; $\zeta(t)$ - параметри завади у відповідності до рис.8.14; $\omega_{comp}=50$ рад/ у.о.; $\tau=0.25$ у.о.; $K_0=1$

а)

в)



б)

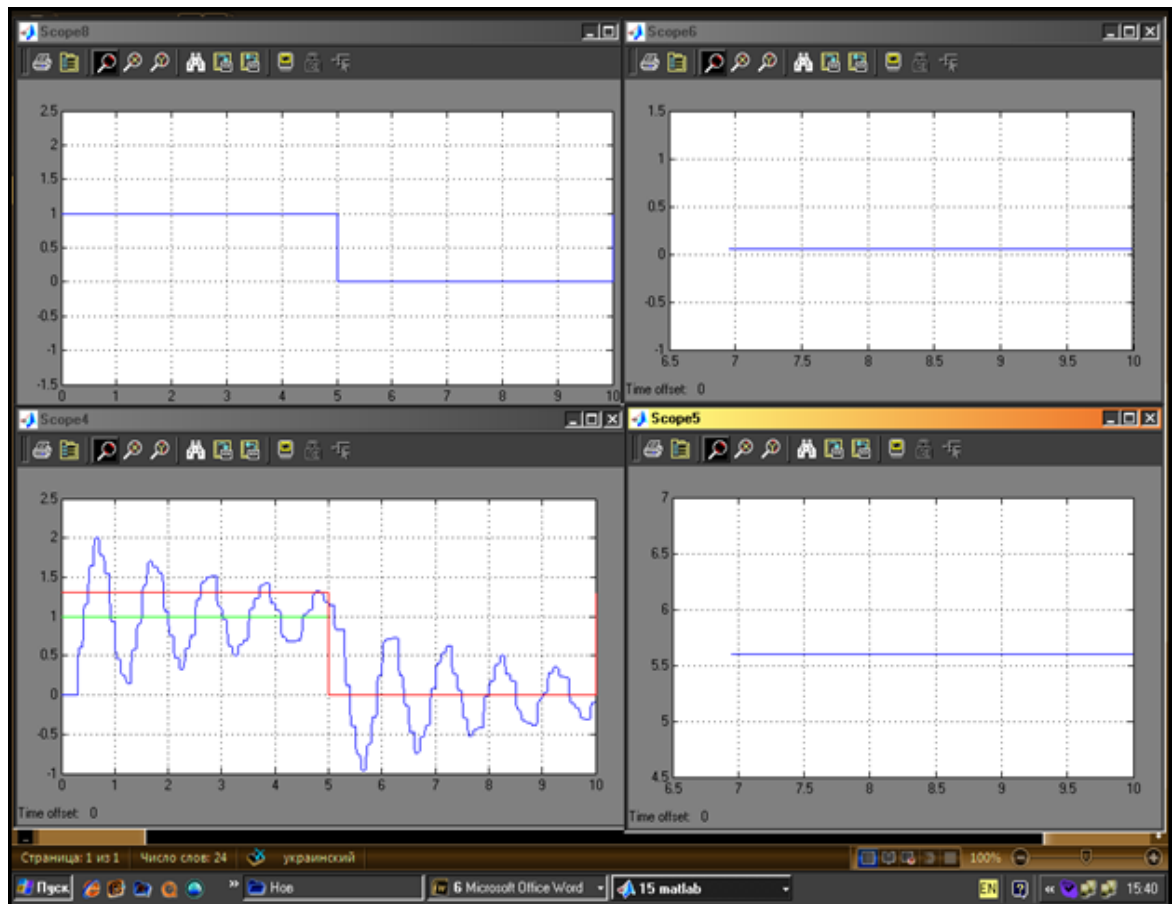
г)

Рис. 8.17. Сигнали у КК з адаптацією: а) вхідний східчастий сигнал $l(t)$;

б) вихідний сигнал КК; в) $k_D(t)$; г) $k_D(t)$; $\zeta(t)$ - параметри завади у відповідності до рис.8.14; $\omega_{comp}=50$ рад/ у.о.; $\tau=0.25$ у.о.; $K_0=1$

а)

в)



б)

г)

Рис. 8.18. Сигнали у КК без адаптації: а) вхідний східчастий сигнал $1(t)$; б) вихідний сигнал КК; в) $k_{II}(t)$; г) $k_{II}(t)$; $\zeta(t)=1\sin 10t$; $\omega_{comp}=50$ рад/у.о.; $\tau=0.25$ у.о.; $K_0=1$

Вихідні сигнали КК, які наведені на рис. 8.4 – рис. 8.18, показують характер зміни координати x . Цей сигнал характеризує процеси зміни швидкості без урахування інерційної ланки б рис. 8.1

На рис.8.19 –рис.8.34 показані результати дослідження моделі з врахуванням інерційної ланки РО. При змінюванні параметрів об'єкту, завод та збурень у широких границях адаптивний контур керування реалізує однакові аперіодичні процеси зміни швидкості. На рис.8.33, рис.8.34 показаний характер процесів зміни швидкості при різних параметичних збуреннях, як видно, характер процесів аперіодичний.

На рис.8.35 показаний характер зміни сигналів швидкості для дизель-поїзда ДЕЛ-02 не в умовних, а в абсолютних величинах. Цей поїзд має такі характеристики: маса при максимальному загрузенні пасажирями -240 т; маса при занятих тільки сидячих місцях -207 т; маса без пасажирів -173 т; діапазон зміни прискорення $a=0.15 - 0.6 \text{ м/с}^2$.

З цього рисунку видно, що розгін від 0 км/год до швидкості $v=60$ км/год або гальмування зі швидкості 60 км/год до 0 км/год при прискоренні, наприклад $0,27 \text{ м/с}^2$ виконується приблизно за час $t=v/a=(60000/3600)/0.27=60 \text{ с}$.

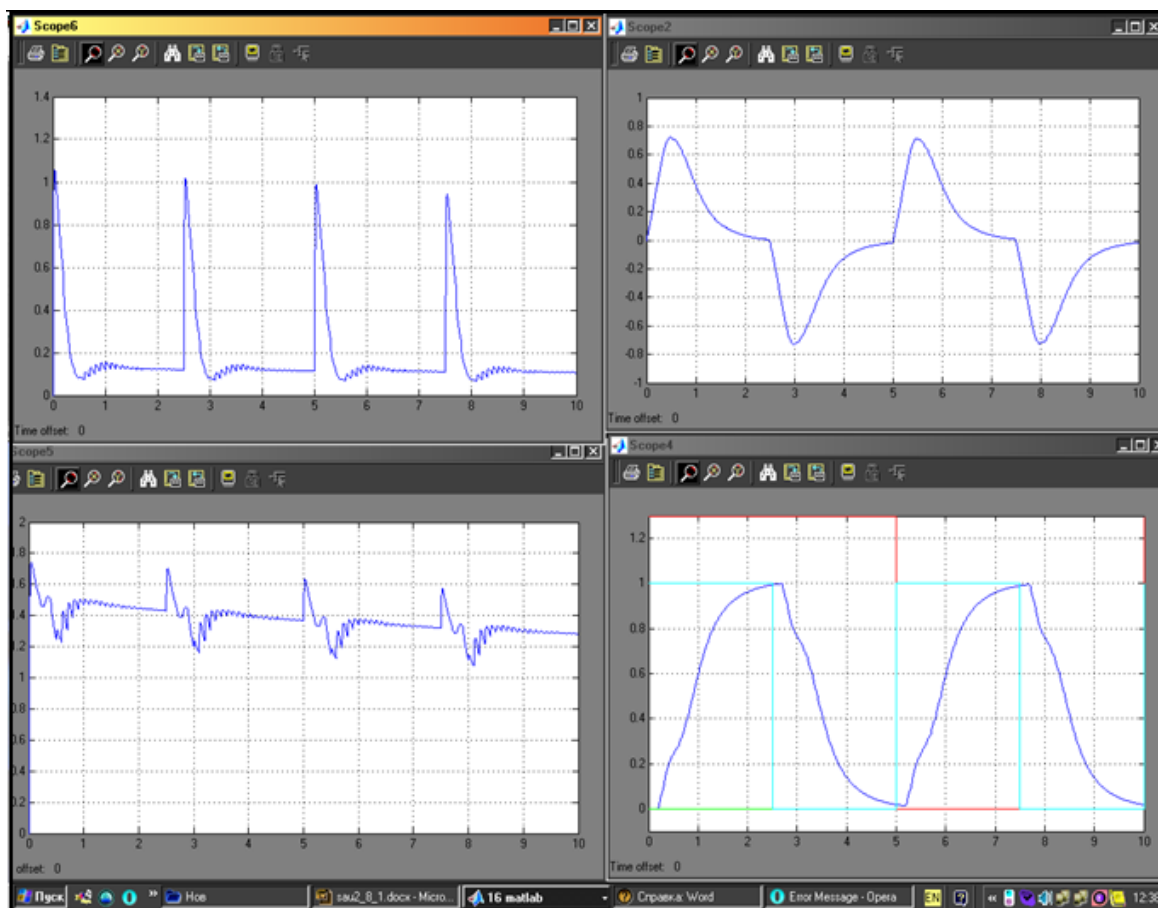
На рис.8.19-рис.8.32 (позиції а) та б)) показана зміна параметрів настроювання адаптивного регулятора у режимі *динамічної адаптації*, за рахунок якої забезпечується висока якість процесів керування.

Отримані результати моделювання дають змогу сформулювати необхідні дані для використання в контурах керування мікропроцесорних контролерів, які побудовані на різних принципах функціонування [229].

2

а)

в)



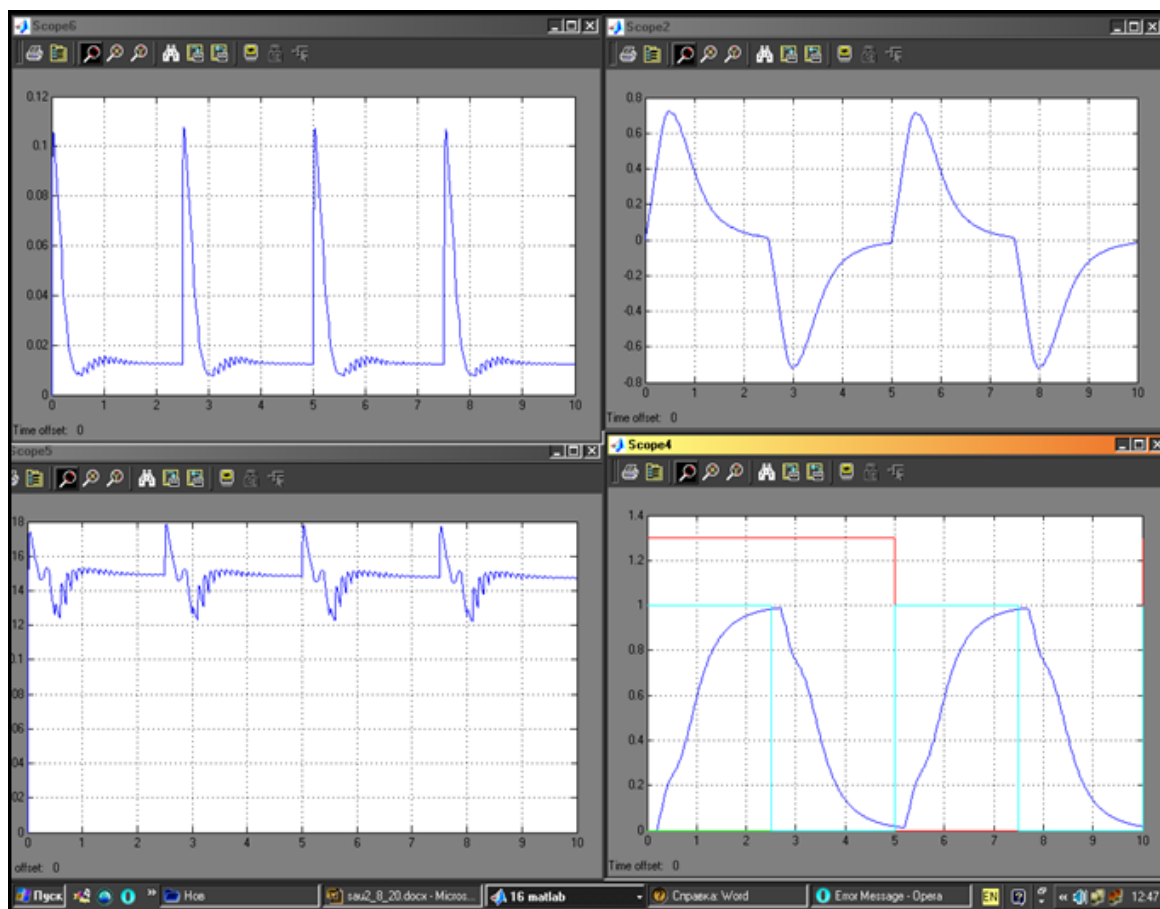
б)

г)

Рис. 8.19. Сигнали у КК з адаптацією: а) $k_{II}(t)$; б) $k_{II}(t)$; в) сигнал похибки; г) вихідний сигнал; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал $1(t)$; період 5 у.о.; початкова частота сполучення адаптивного фільтру $\omega_{comp}=1.5$ рад/ у.о.; запізнювання об'єкту $\tau=0.1$ у.о.; $Tau=0.25$ у.о.; коефіцієнт передачі об'єкту $K_0=1$

а)

в)



б)

г)

Рис. 8.20. Сигнали у КК з адаптацією: а) $k_{II}(t)$; б) $k_{II}(t)$; в) сигнал похибки; г) вихідний сигнал; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал $1(t)$; період 5 у.о.; початкова частота сполучення адаптивного фільтру $\omega_{comp}=1.5$ рад/ у.о.; запізнювання об'єкту $\tau=0.1$ у.о.; $Tau=0.25$ у.о.; коефіцієнт передачі об'єкту $K_0=10$

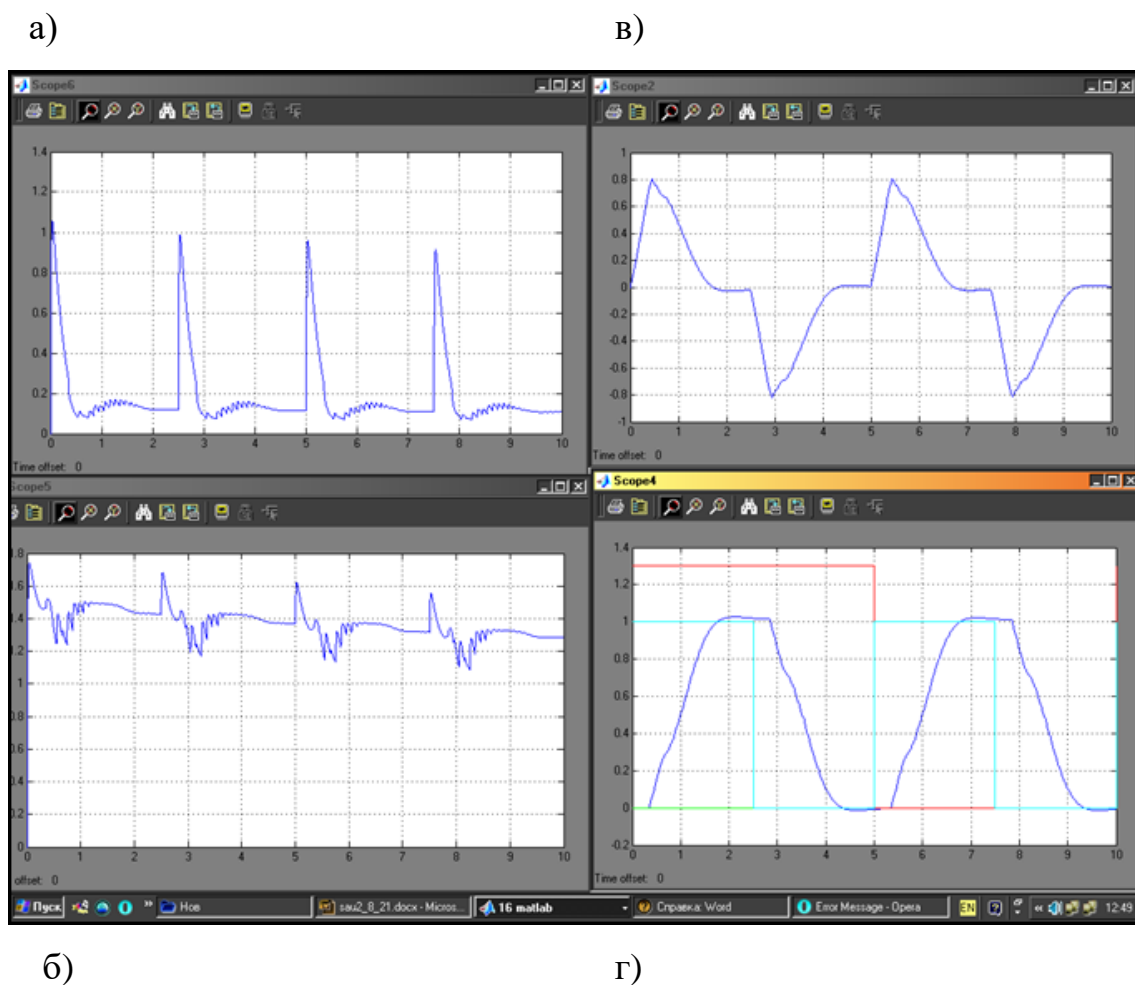
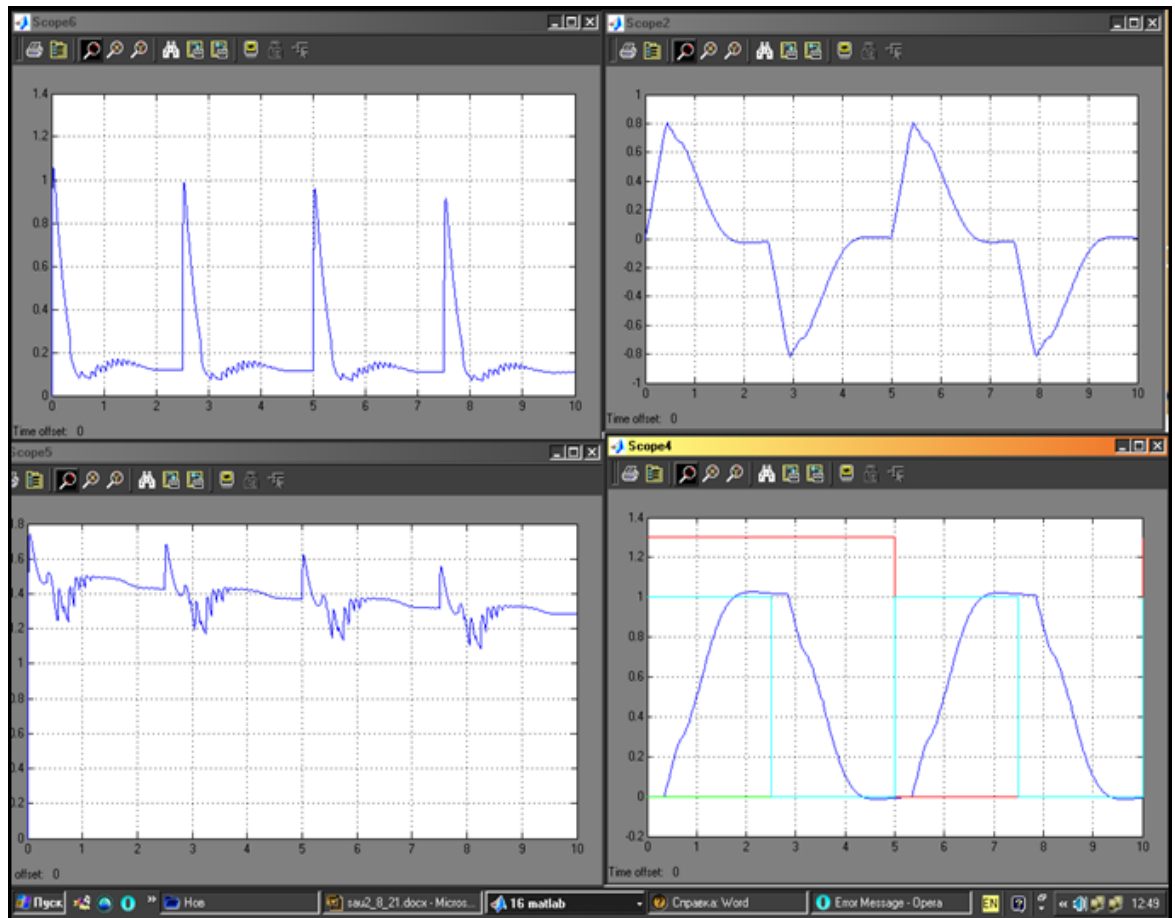


Рис. 8.21. Сигнали у КК з адаптацією: а) $k_{II}(t)$; б) $k_{II}(t)$; в) сигнал похибки; г) вихідний сигнал; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал $1(t)$; період 5 у.о.; початкова частота сполучення адаптивного фільтру $\omega_{comp}=1.5$ рад/ у.о.; запізнювання об'єкту $\tau=0.25$ у.о.; $Tau=0.25$ у.о.; коефіцієнт передачі об'єкту $K_0=1$

a)

b)



б)

г)

Рис. 8.22. Сигнали у КК з адаптацією: а) $k_{II}(t)$; б) $k_{II}(t)$; в) сигнал похибки; г) вихідний сигнал; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал $1(t)$; період 5 у.о.; початкова частота сполучення адаптивного фільтру $\omega_{comp}=1.5$ рад/ у.о.; запізнювання об'єкту $\tau=0.25$ у.о.; $Tau=0.25$ у.о.; коефіцієнт передачі об'єкту $K_0=10$

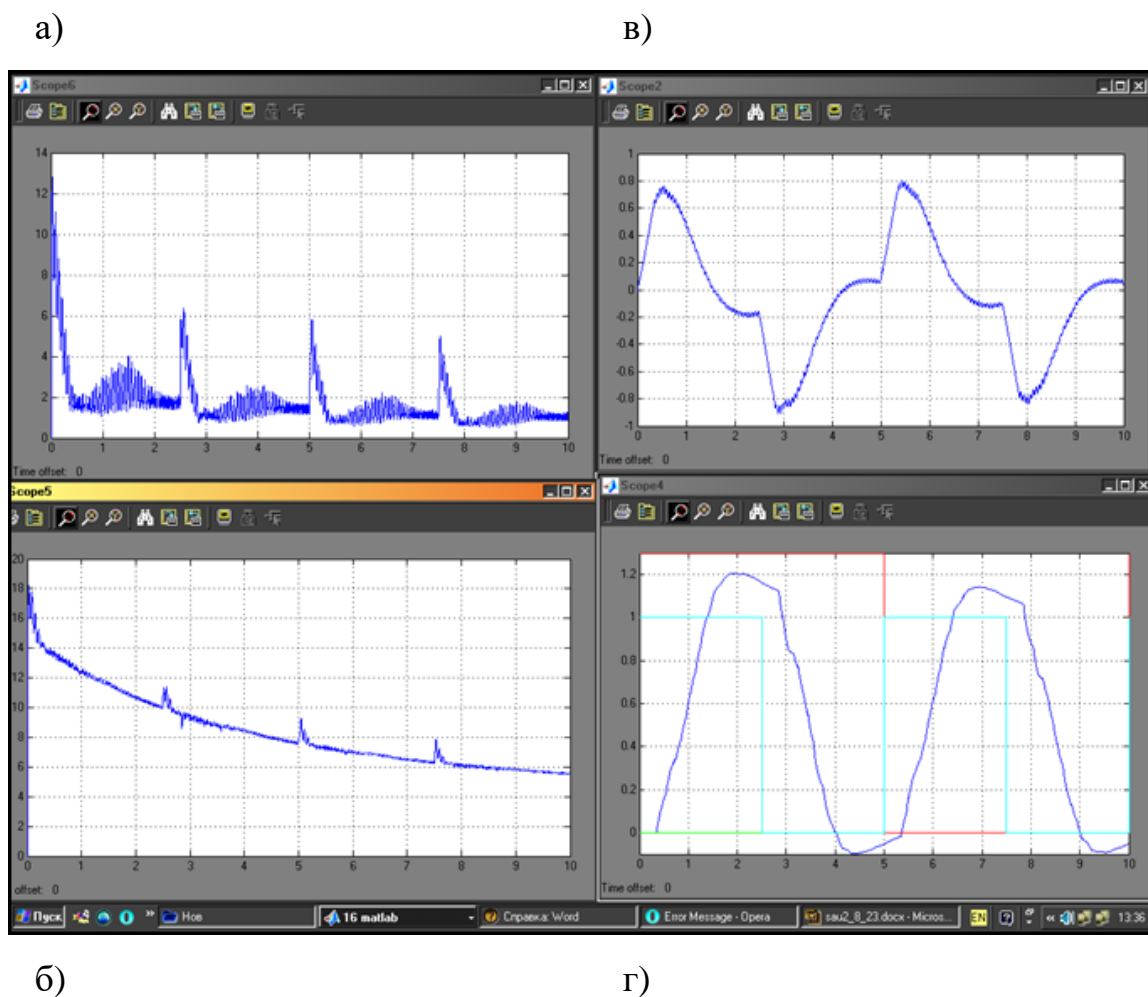
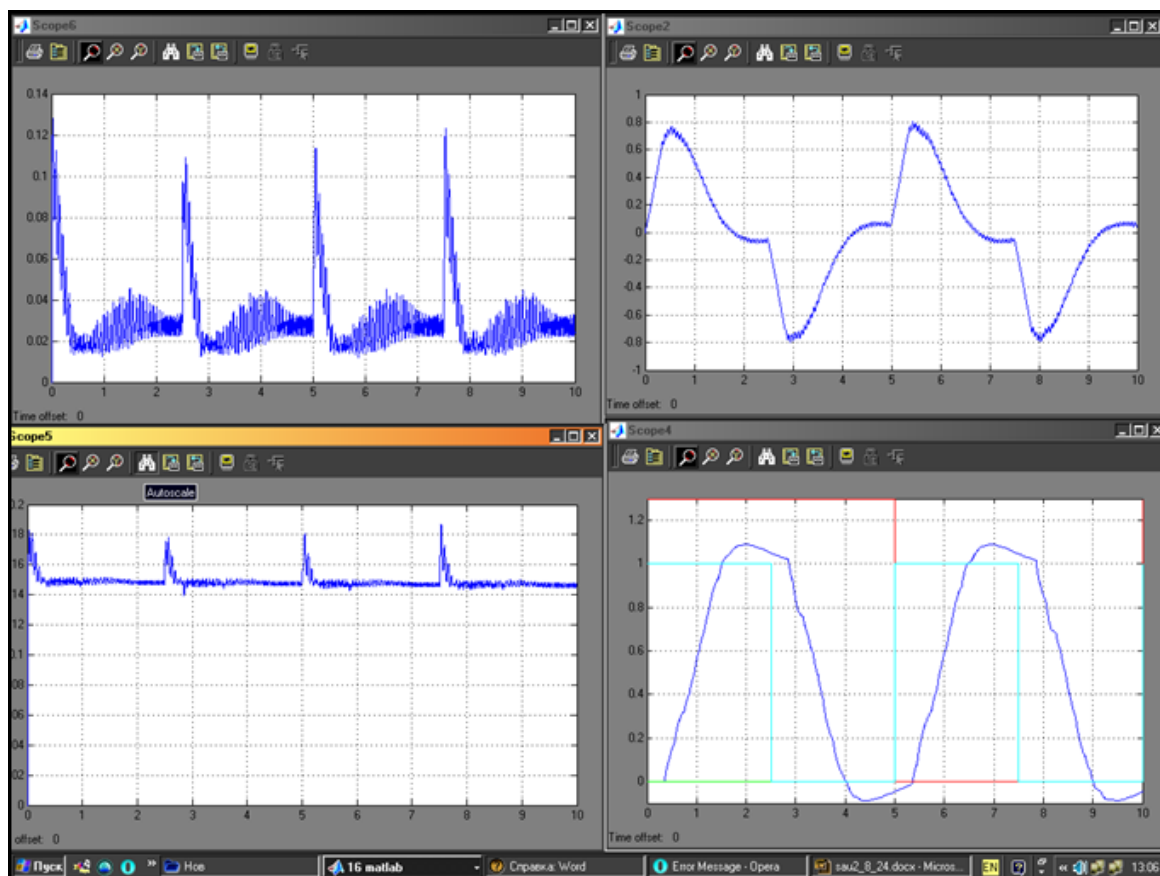


Рис. 8.23. Сигнали у КК з адаптацією: а) $k_{II}(t)$; б) $k_{II}(t)$; в) сигнал похибки; г) вихідний сигнал; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал $1(t)$; період 5 у.о.; $\xi(t)$ - параметри завади $0.3\sin 100t$; початкова частота сполучення адаптивного фільтру $\omega_{comp}=1.5$ рад/ у.о.; запізнювання об'єкту $\tau=0.25$ у.о.; $Tau=0.25$ у.о.; коефіцієнт передачі об'єкту $K_0=10$

а)

в)



б)

г)

Рис. 8.24. Сигнали у КК з адаптацією: а) $k_{II}(t)$; б) $k_{II}(t)$; в) сигнал похибки; г) вихідний сигнал; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал $1(t)$; період 5 у.о.; $\zeta(t)$ - параметри завади $0.3\sin 100t$; початкова частота сполучення адаптивного фільтру $\omega_{comp}=1.5$ рад/ у.о.; запізнювання об'єкту $\tau=0.1$ у.о.; $Tau=0.25$ у.о.; коефіцієнт передачі об'єкту $K_0=0.1$

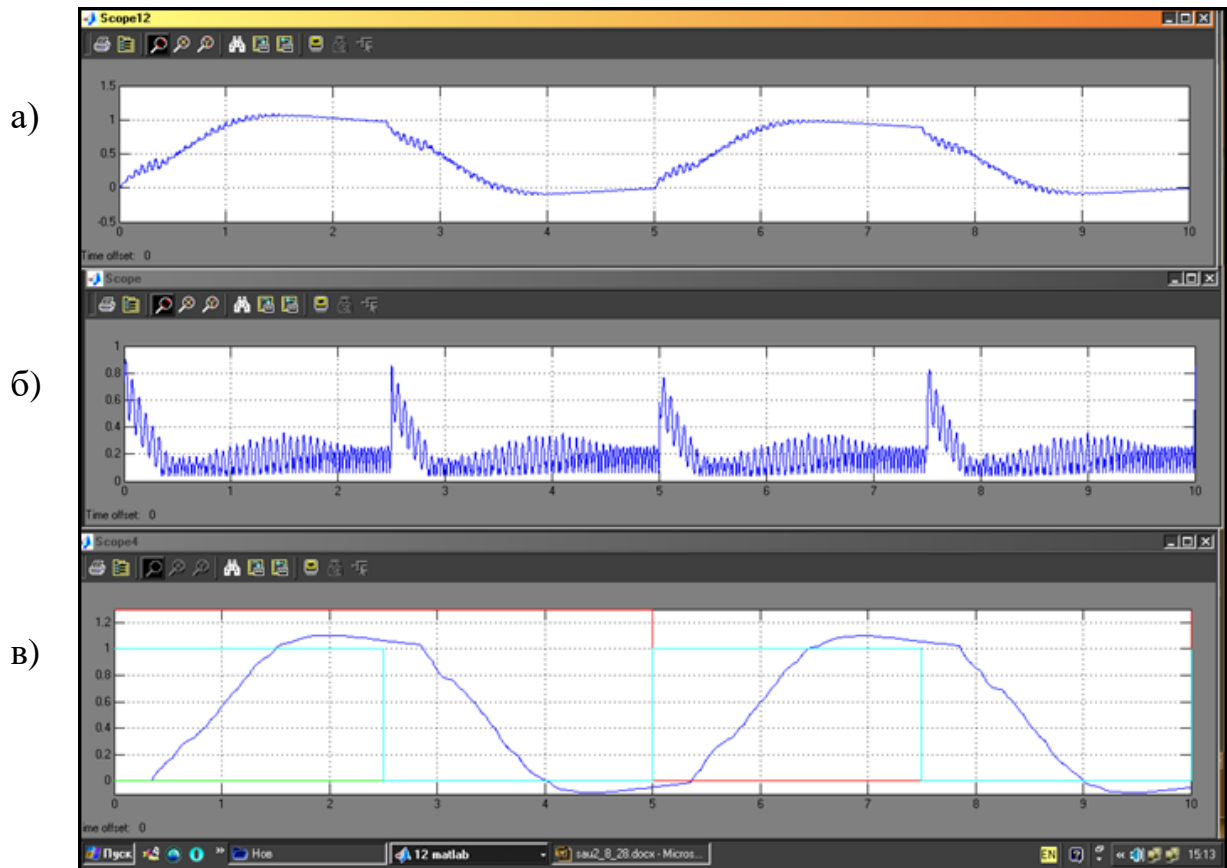


Рис. 8.28. Сигнали у КК з адаптацією: а) сигнал керування приводом; б) оптимальна стала часу адаптивного фільтру; в) вихідний сигнал; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал $1(t)$; період 5 у.о.; $\xi(t)$ - параметри завади $0.3\sin 100t$; початкова частота сполучення адаптивного фільтру $\omega_{comp}=1.5$ рад/ у.о.; запізнювання об'єкту $\tau=0.25$ у.о.; $Tau=0.25$ у.о.; коефіцієнт передачі об'єкту $K_0=1$

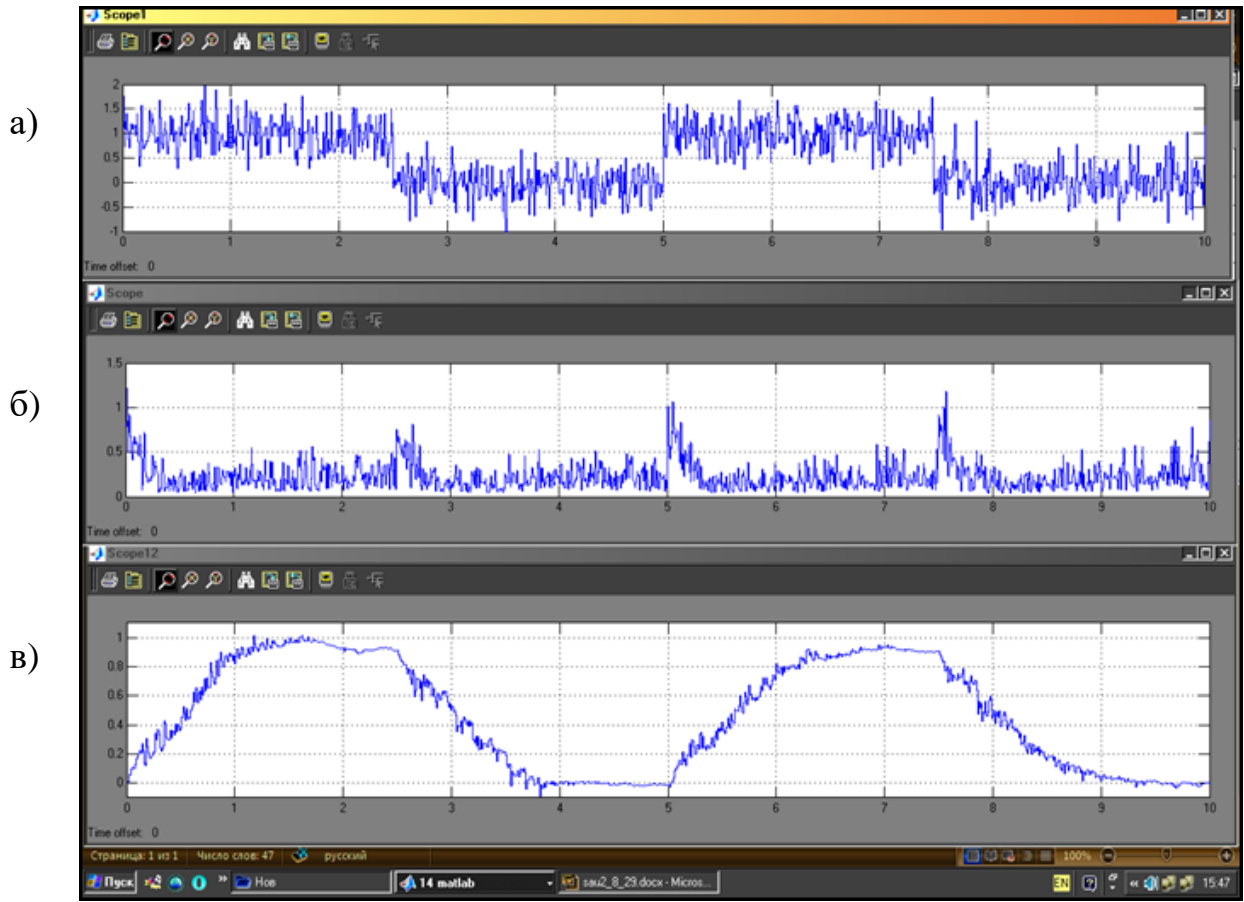


Рис. 8.29. Сигнали у КК з адаптацією: а) адитивна суміш вхідного сигналу та випадкової завади; б) оптимальна стала часу адаптивного фільтру; в) сигнал керування електроприводом; базові параметри настроювання моделі: вхідний сідчастий сигнал $1(t)$; період 5 у.о.; завада $\zeta(t)$ з параметрами: потужність 0.001, період 0.01 у.о., початкове значення генератора випадкових чисел 23341; початкова частота сполучення адаптивного фільтру $\omega_{comp}=1.5$ рад/ у.о.; запізнювання об'єкту $\tau=0.25$ у.о.; $Tau=0.25$ у.о.; коефіцієнт передачі об'єкту $K_0=1$

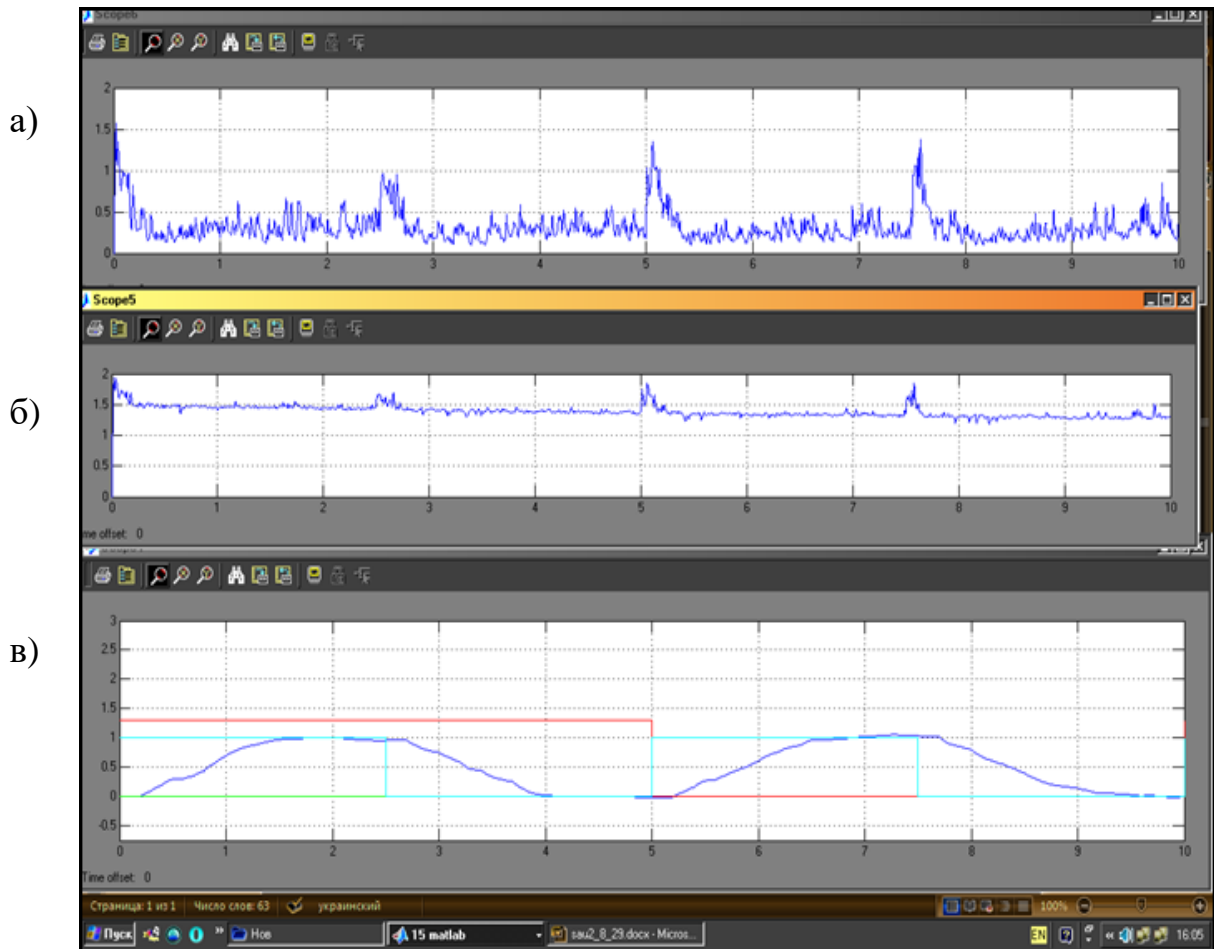


Рис. 8.30. Сигнали у КК з адаптацією: а) k_{II} ; б) k_{II} ; в) вихідний сигнал швидкості; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал $1(t)$; період 5 у.о.; завада $\zeta(t)$ з параметрами: потужність 0.001, період 0.01 у.о., початкове значення генератора випадкових чисел 23341; початкова частота сполучення адаптивного фільтру $\omega_{comp}=1.5$ рад/ у.о.; запізнювання об'єкту $\tau=0.25$ у.о.; $\text{Tau}=0.25$ у.о.; коефіцієнт передачі об'єкту $K_0=1$

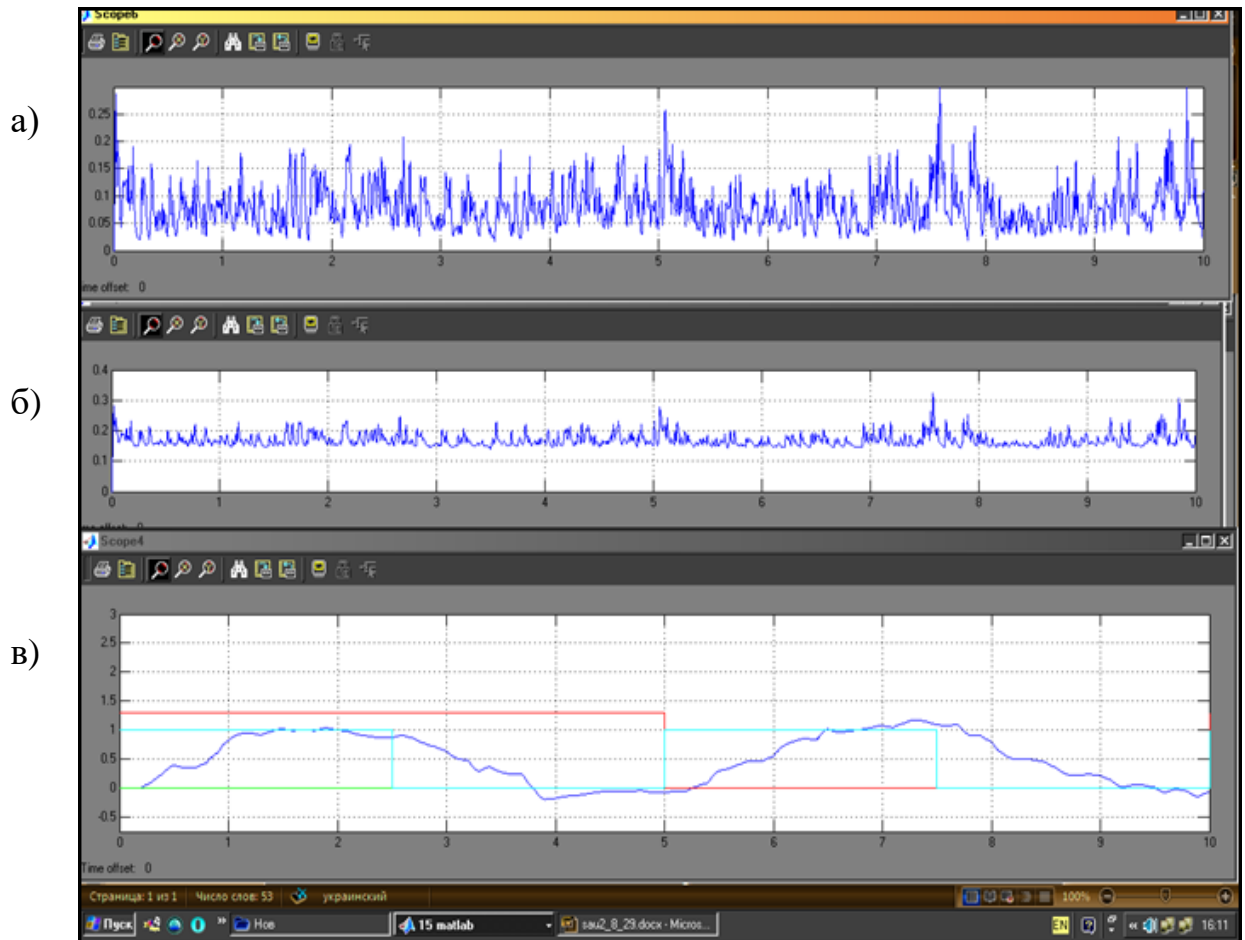


Рис. 8.31. Сигнали у КК з адаптацією: а) k_{II} ; б) k_{II} ; в) вихідний сигнал швидкості; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал $1(t)$; період 5 у.о.; завада $\zeta(t)$ з параметрами: потужність 0.01, період 0.01 у.о., початкове значення генератора випадкових чисел 23341; початкова частота сполучення адаптивного фільтру $\omega_{conp}=1.5$ рад/ у.о.; запізнювання об'єкту $\tau=0.25$ у.о.; $\text{Tau}=0.25$ у.о.; коефіцієнт передачі об'єкту $K_0=10$

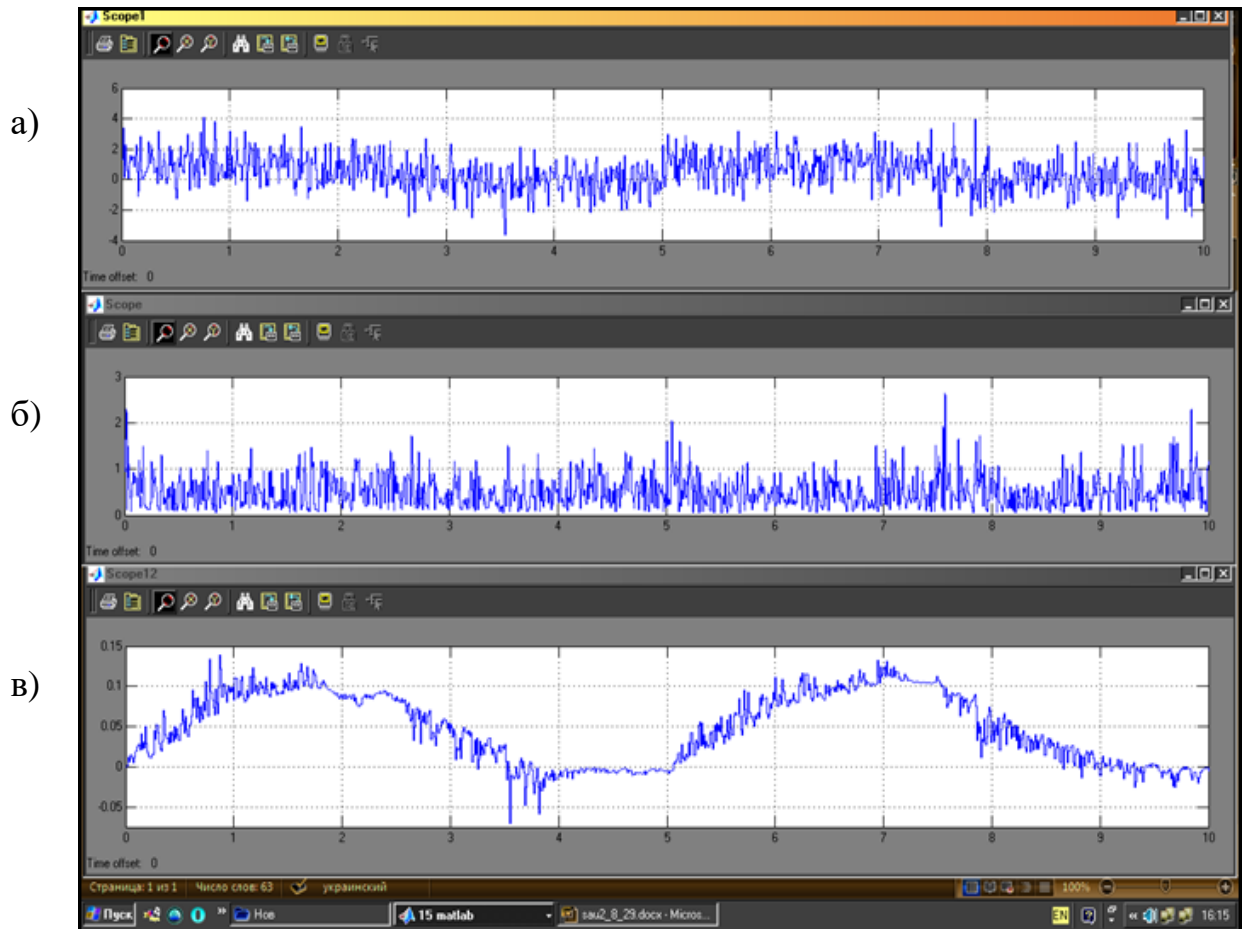


Рис. 8.32. Сигнали у КК з адаптацією: а) адитивна суміш вхідного сигналу та випадкової завади; б) оптимальна стала часу адаптивного фільтру; в) сигнал керування електроприводом; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал $1(t)$; період 5 у.о.; завада $\zeta(t)$ з параметрами: потужність 0.01, період 0.01 у.о., початкове значення генератора випадкових чисел 23341; початкова частота сполучення адаптивного фільтру $\omega_{comp}=1.5$ рад/ у.о.; запізнювання об'єкту $\tau=0.25$ у.о.; $\text{Tau}=0.25$ у.о.; коефіцієнт передачі об'єкту $K_0=10$

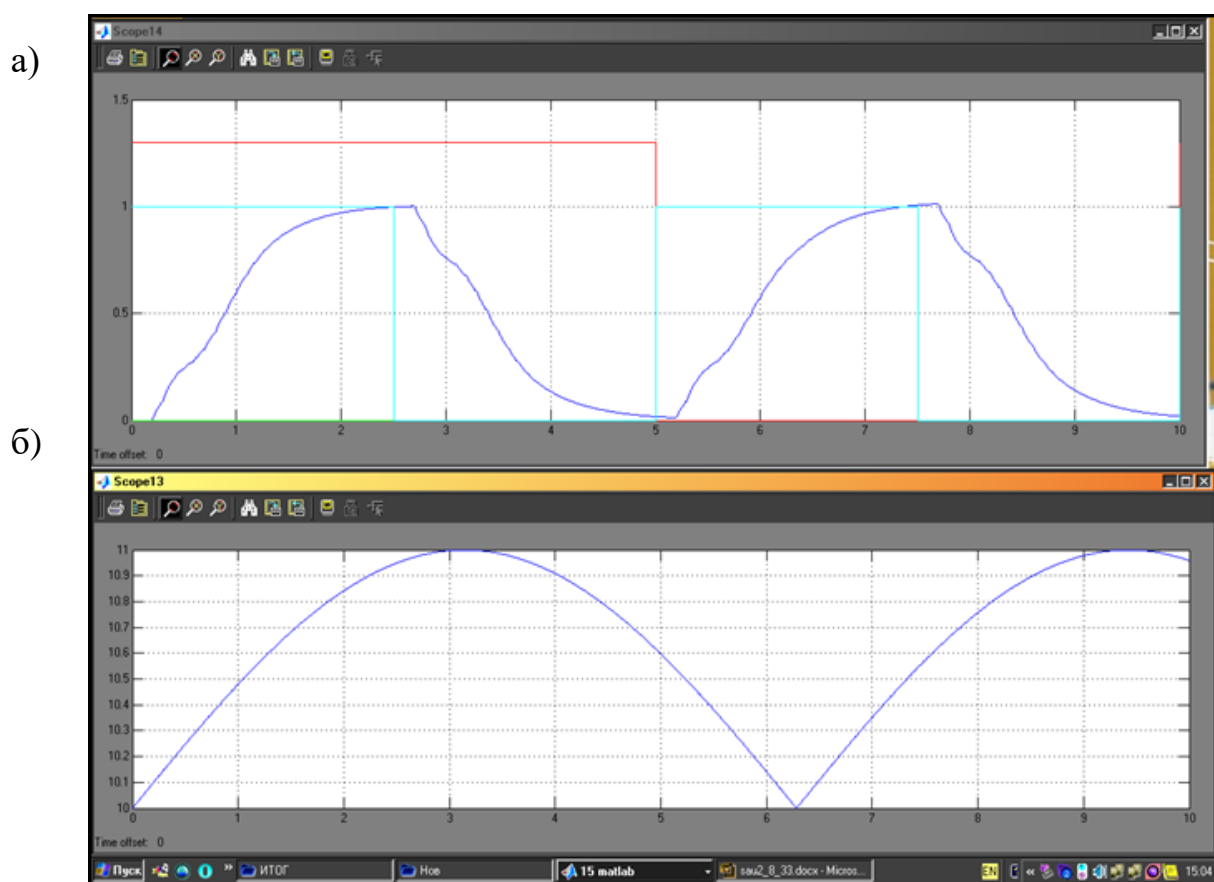


Рис. 8.33. Сигнали у КК з адаптацією: а) вхідний та вихідний сигнали; б) сигнал збурення $1 \sin 0.5t$; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал $1(t)$, період 5 у.о.; початкова частота сполучення адаптивного фільтру $\omega_{comp}=1.5$ рад/ у.о.; запізнювання об'єкту $\tau=0.25$ у.о.; $T_{au}=0.25$ у.о.; коефіцієнт передачі об'єкту $K_0=10$;

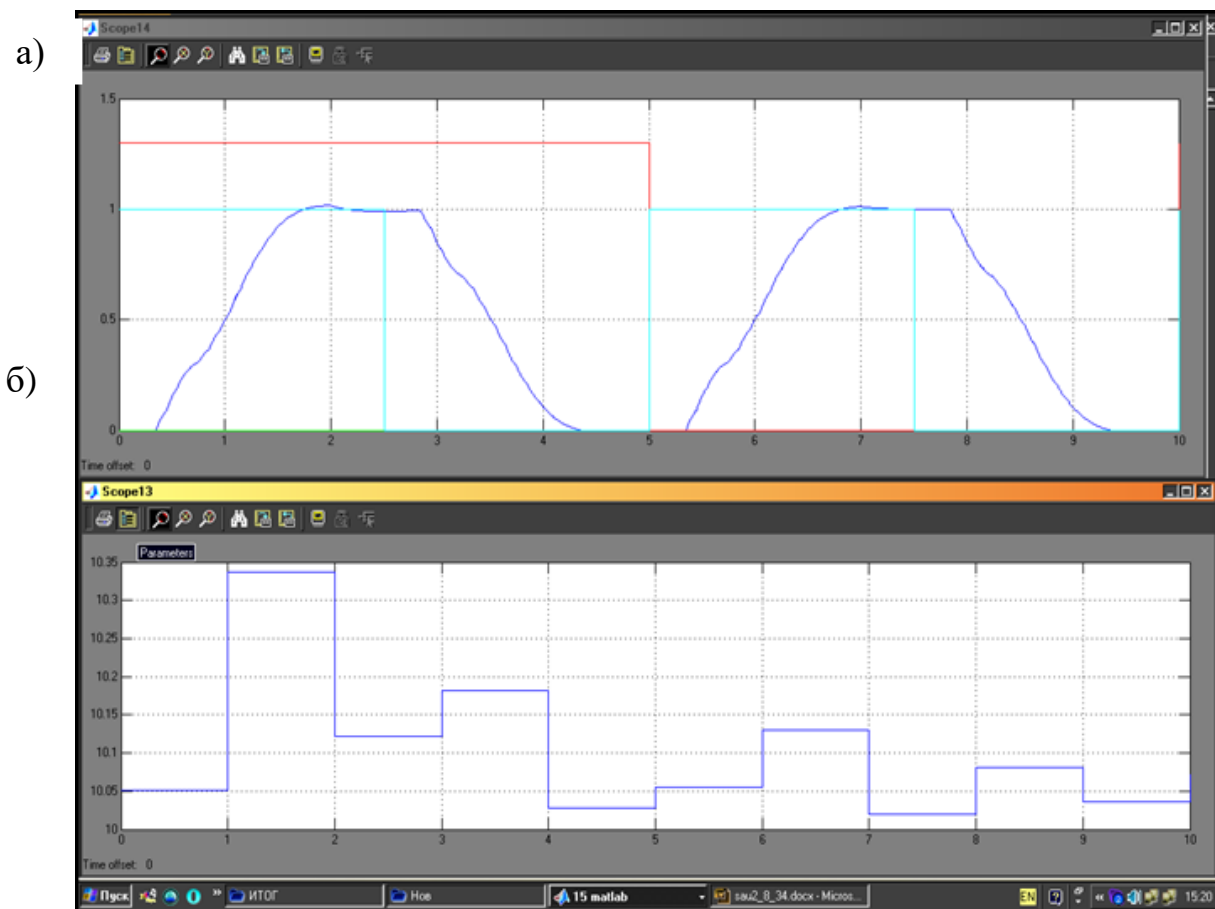


Рис. 8.34. Сигнали у КК з адаптацією: а) вхідний та вихідний сигнали; б) сигнал збурення випадковий: амплітуда 0.02, період формування 0.1, seed 23341; базові параметри настроювання моделі: вхідний східчастий сигнал $1(t)$; період 5 у.о.; початкова частота сполучення адаптивного фільтру $\omega_{comp}=1.5$ рад/ у.о.; запізнювання об'єкту $\tau=0.25$ у.о.; $Tau=0.25$ у.о.; коефіцієнт передачі об'єкту $K_0=10$;

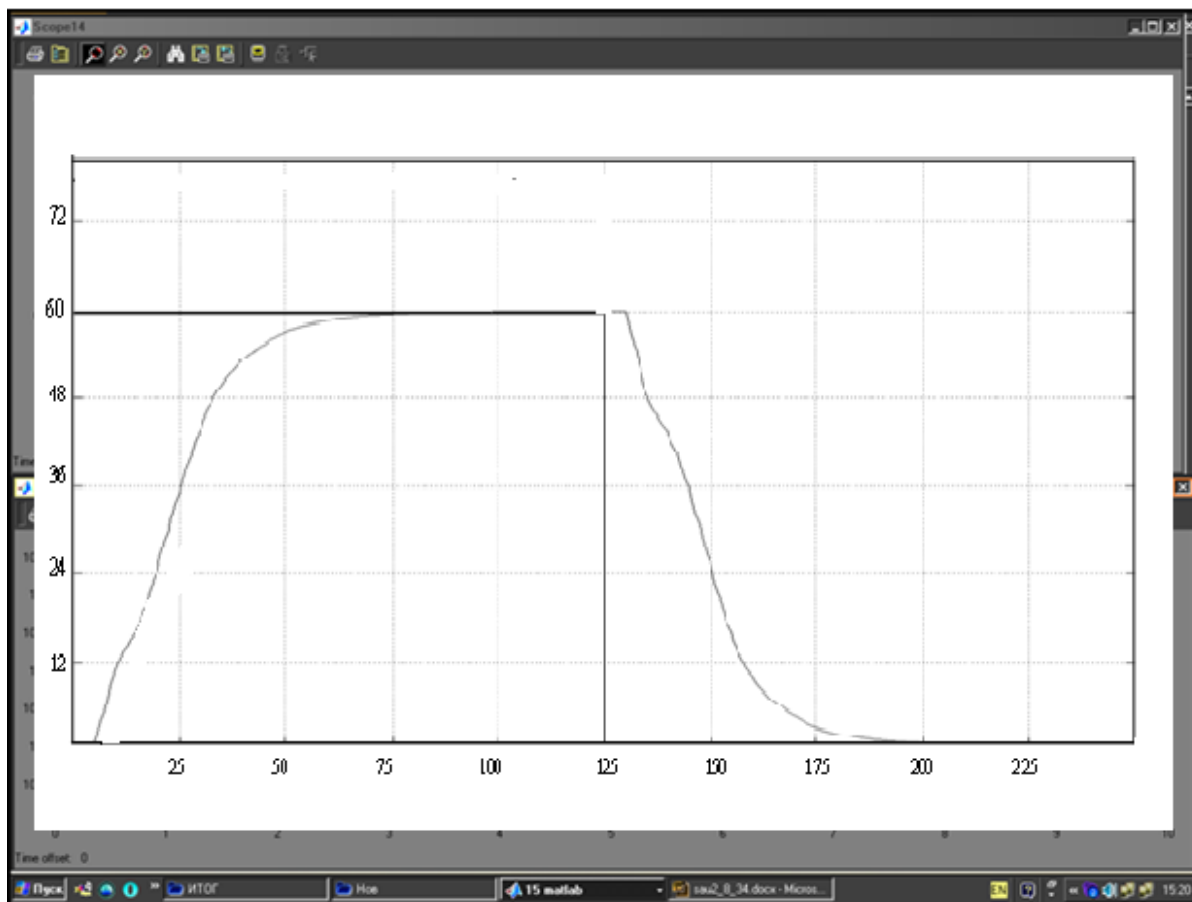


Рис.8.35. Графік зміни швидкості для дизель-поїзда ДЕЛ -02 у реальному масштабі швидкості (км/год) і часу (с)

Висновки

1. На основі синтезу закону безпосереднього цифрового керування для КК з бажаними характеристиками показано, що для моделі РО у вигляді двох аперіодичних ланок із запізнюванням оптимальним є ПД-регулятор. Одержано співвідношення для параметрів k_P , k_I , k_D настроювання ПД-регулятора в залежності від оптимальної сталої часу адаптивного фільтра T_{opt} та еквівалентного запізнювання РО

$$\tau(x) = \left(\frac{x^2}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}}$$

2. Розроблено процедуру розрахунку параметрів адаптивних регуляторів за критерієм максимального ступеню стійкості. Отримані вирази для критерію максимального ступеню стійкості та параметрів настроювання регуляторів в залежності від відношень рівнів завади до корисного сигналу та еквівалентного запізнювання, яке є функцією координати x вздовж РО. Обґрунтовано вибір періоду квантування цифрового закону керування в залежності від критерію максимального ступеню стійкості.

3. Розроблено структуру адаптивного контуру керування РО із еквівалентним запізнюванням, ПД – регулятором та його універсальну MatLab – модель. До складу моделі входять: адаптивний фільтр, стала часу якого визначається блоком настроювання фільтру; адаптивний регулятор з блоком настроювання регулятора. Останній використовує сигнали з бази даних та сигналів, а також з моделі РО, яка містить блок еквівалентного запізнювання та інерційну ланку. В моделі також передбачено формування різних збурень. Зворотний зв'язок організовано за сигналом швидкості, який знімається з точки поточної координати x

поїзду . База даних та сигналів містить детерміновані та випадкові сигнали та збурення. Така модель реалізує режим динамічної адаптації та дає змогу досліджувати різні режими функціонування контурів керування швидкістю РО.

4. Дослідження поведінки адаптивних контурів керування показало їх високі динамічні властивості, при цьому забезпечується реалізація аперіодичних процесів зміни швидкості, що є важливим при керуванні різними рейковими засобами залізниць. На основі виконаних досліджень можуть бути сформовані необхідні дані для використання в контурах керування швидкістю РО залізничного транспорту мікропроцесорних контролерів .

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішено науково-прикладну проблему розроблення і обґрунтування перспективної концепції синтезу систем автоматизованого керування засобами рейкового транспорту залізниць (СК РТ) на основі теоретичного розвитку та узагальнення моделей та методів для забезпечення автоматизованого ведення графіку руху поїздів.

На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Аналіз існуючих автоматизованих систем керування засобами рейкового транспорту показав, що їм притаманні суттєві недоліки - не враховуються нечіткі ситуації, характерні при керуванні параметрами рухомих одиниць; не формуються завдання для підтримання раціональної швидкості рухомих одиниць; моделі РО не адекватні їх розподіленому характеру; не використовуються методи адаптації при побудові контурів керування РО. Обмежені можливості диспетчерів та машиністів РО при збільшенні кількості зовнішніх факторів (в тому числі при необхідності зростання швидкості) не дозволяють їм приймати оперативні керуючі дії, що потребує розширення функціональних можливостей систем керування засобами рейкового транспорту.

2. Вперше на основі обґрунтованих критеріїв оптимізації, розроблених моделей та методів побудови ієрархічних рівнів системи сформовано основні положення перспективної концепції побудови автоматизованих систем керування засобами рейкового транспорту. Це дасть можливість в умовах необхідного підвищення швидкості РО за рахунок моделювання ситуацій спростити процедуру прийняття керуючих дій, що підвищить безпеку експлуатації рейкових засобів залізниць.

3. На основі системного підходу розроблено вимоги до моделей підсистем середнього (диспетчерського) та нижнього рівнів керування РО. Показано, що при побудові СК РТ необхідно удосконалення організаційно-диспетчерського управління та керування РО, як об'єктами з розподіленими параметрами. Це надає змогу формувати дані про кількість необхідних рейкових засобів залізниць та їх швидкість в залежності від поточних

ситуацій та значно скорочує час вироблення керуючих дій для контурів керування РО у нечітких ситуаціях, що дозволить підвищити стабільність графіку руху, наприклад, пасажирських перевезень з 92 до 95%.

4. Удосконалено критерії оптимізації:

- при моделюванні підсистеми середнього рівня на основі графових структур обрано критерії: комплексної оцінки необхідних апаратних та програмних засобів; оперативності формування керуючих дій з обґрунтуванням впевненості прийняття рішень в залежності від результатів моделювання, при цьому у ролі узагальненого показника оперативності використано ймовірність розв'язання задачі моделювання на заданому інтервалі часу;

- для вибору параметрів настроювання КК швидкістю РО на нижньому рівні запропоновано використовувати критерій максимального ступеня стійкості, що дає змогу отримати інженерні співвідношення, які являють собою алгебраїчні вирази з однозначним зв'язком параметрів настроювання регуляторів і параметрів моделі. Отримані та обґрунтовані аналітичні залежності параметрів настроювання адаптивних фільтрів та регуляторів контурів керування рухомими одиницями на нижньому рівні СК РТ, які на відміну від відомих залежностей враховують зміну поточних значень сигналів та завад і дозволяють реалізувати нові процедури динамічної адаптації; при цьому доведено, що РО як об'єкт керування з розподіленими параметрами може бути описаний лінійною динамічною ланкою із еквівалентним запізнюванням. Це дозволяє більш достовірно проводити облік динамічних властивостей поїздів, як об'єктів керування, покращити якість функціонування контурів керування, та як наслідок за рахунок підвищення стабільності підтримання графіку руху, зменшити кількість непередбачуваних зупинок, нераціональних затримок поїздів всіх категорій на дільницях залізниць.

5. Вперше запропоновані наступні нові розширення чітких та нечітких мереж Петрі:

розширення чітких мереж Петрі, яке полягає в доповненні відомих елементів мереж новими елементами – квазідвонаправленими дугами і їхніми

з'єднаннями, введення яких збільшує мовні можливості зображення графів особливо при побудові моделей, які відтворюють маневрові пересування, при цьому скорочується складність моделей у діапазоні 15 – 50%; для надання чітким мережам Петрі динамічних властивостей в переході на відміну від відомих мереж введено затримку міток у часі на будь-яке число тактів моделювання, що дає можливість досліджувати динаміку функціонування мереж у реальному часі з використанням методів аналізу та синтезу динамічних систем; для нечітких мереж Петрі введені такі нові розширення функціональних переходів: імплікаційний перехід – відношення «якщо - то»; переходи, які реалізують операції композиції нечітких множин та відношень множин, фазифікації вхідних змінних для їх агрегування; дефазифікації вихідних змінних для активізації підзаключень.

На основі вказаних розширень створено універсальну графову модель диспетчерських підсистем керування параметрами РО, яка враховує нечіткі умови та дає змогу досліджувати процедури формування керуючих дій на контури керування РО (завдання швидкості руху з метою автоматизованого ведення графіку) і дозволяє скоротити час вироблення керуючих дій до 2-х разів.

6. Запропоновано організацію декларативної бази знань ситуаційної підсистеми диспетчерського керування рухом рейкових засобів залізниць на основі сукупності продукційних правил оцінки поточних ситуацій, правил оцінки та формування узагальненої модельної ситуації, правил формування керування. Розроблено нову концепцію організації підсистем ситуаційного диспетчерського керування і формування керуючих дій, виконано структурування підсистем, сформовані фрагменти ситуацій.

7. Обґрунтовано метод формального опису руху окремих рухомих одиниць на основі локальних моделей та сукупності рухомих одиниць на основі глобальної моделі. Запропоновано моделі різних маршрутів, які функціонують у реальному часі. Моделі побудовані із використанням мереж Петрі, операторів зсуву Z^{-1} , Z - перетворення та враховують динаміку руху, при цьому враховується розміщення РО на маршрутній мережі, зміна відстані і вікон між РО, а також розподіл конкретних РО на окремих маршрутах в дискретні моменти часу.

8. Вперше розроблено метод адаптивної фільтрації сигналів, які обробляються в КК швидкістю, на основі визначення поточних оцінок характеристик сигналів та завад (рівня R корисного сигналу та рівня Q завади). На відміну від класичних методів не потребується накопичення інформації про статистичні характеристики сигналу та завад. Шляхом поточного обчислення відношення рівнів завада/сигнал цей метод дозволяє у режимі динамічної адаптації неперервно підстроювати основний параметр -сталу часу та сформувати параметричний сигнал, пропорційний відношенню Q/R , для настроювання параметрів адаптивного контуру керування.

Удосконалено критерій оптимізації, що характеризує перевищення оцінкою $\frac{1}{3}|y^3(t)|$ потужності вихідного сигналу фільтра потужності складової вихідного сигналу, викликаного завадою. Це дозволяє більш ефективно придушувати завадові складові у вихідному сигналі.

Синтезований на основі цього методу адаптивний фільтр підвищує коефіцієнт приглушення завад у 70-100 разів (до 40 дБ) при діапазоні динамічної адаптації сталої часу фільтра 0,01 – 10 с, що покращує динамічні характеристики КК швидкістю.

9. Обґрунтовано модель РО, яка відображує реальні процеси в поїзді з врахуванням запізнювання за довжиною поїзда, яке залежить не тільки від точки (координати), що визначає процес формування й передачі сигналів керування, але й від часу. Доведено умови, при яких модель РО, описувану рівняннями в частинних похідних, можна замінити звичайним диференціальним рівнянням з еквівалентним постійним (для даної координати x) запізнюванням. Це дозволило спростити математичну модель РО (замінити сіткову модель великої розмірності одним рівнянням) та застосувати до синтезу регуляторів для КК відомі аналітичні методи. Доведено адекватність моделі з запізнюванням моделі у часткових похідних.

10. Отримано прості алгебраїчні вирази для автопідстроювання параметрів контурів керування швидкістю в залежності від поточного відношення Q/R , змінюваних у часі параметрів моделі РО (коефіцієнт

передачі, еквівалентне запізнення), що на відміну від відомих методів забезпечує динамічну адаптацію параметрів регуляторів. Динамічна адаптація надає змогу розширити діапазон працездатності КК при змінюванні запізнювання в широких межах від 0,01 до 1 у.о. (до 25% від сталої часу моделі РО), що значно збільшує швидкодію процесу адаптації КК і забезпечує близьку до оптимальних якостей перехідних процесів при зміні параметрів у широких межах

11. Для контурів керування швидкістю РО, які містять адаптивні фільтри та адаптивні регулятори, розроблено процедури синтезу їх параметрів на основі введеної динамічної адаптації.

Вперше розроблено універсальну модель адаптивного завадостійкого КК, який функціонує у режимі динамічної адаптації. Проведено дослідження динаміки процесів, яке підтвердило отримані теоретичні положення щодо якості процесів керування РО. Показано, що використання критерія максимального ступеню стійкості забезпечує отримання однакових близьких до аперіодичних процесів при зміні характеристик завад та параметрів РО у широких межах. Це дасть змогу при реалізації перспективних КК швидкістю засобів рейкового транспорту залізниць підвищити дільничну швидкість поїздів. При збільшенні цієї швидкості на 10%, наприклад на напрямку Куп'янськ - Одеса, може бути скорочено парк локомотивів та вагонів на 3-4% від існуючого на напрямку загального парку вагонів та локомотивів.

12. Отримані наукові та практичні результати впроваджені на залізницях України та в навчальний процес, що підтверджено відповідними актами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Концепція та Програма реструктуризації на залізничному транспорті України. – К.: НАБЛА, 1998. – 145 с.
2. Смехов А.А. Развитие автоматизированной системы управления грузовой станции / А.А. Смехов. – М.: Транспорт, 1996. – 392 с.
3. Проблемы внедрения информационных технологий на транспорте / Сб. научн. трудов.–К.: Институт кибернетики им. В.М. Глушкова, 1992.–С. 63-67.
4. Александров Є.Є. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами: Підручник. Т.1. Теорія автоматичного керування / Є.Є. Александров, Є.П. Козлов, Б.І. Кузнецов. – Х.: НТУ «ХП», 2002. –490с.
5. Державна програма «Розвиток рейкового рухомого складу соціального призначення для залізничного транспорту та міського господарства» з науково-технічною частиною. – К., 1997. – 152 с.
6. Скоростной и высокоскоростной железнодорожный транспорт в прошлом, настоящем и будущем. Т.1. – СПб.: И-во Информационный центр «Выбор», 2001. – 256 с.
7. Немец Д. Современные системы управления для железнодорожного транспорта / Д. Немец, А. Израелян // Перспективы и тенденции развития электротехнического оборудования. Труды 5-го международного симпозиума ЭЛМАШ. Т.2. – М.: 2004. – С. 19 - 20.
8. Системологія на транспорті: Підручник у 5 кн. / За ред. М.Ф. Дмитриченка. – К.: Знання України, 2005.
9. Weinberg G.M. An Introduction to General Systems Thinking / G.M. Weinberg. – New-York: Wiley – Interscience, 1975. – 416 p.
10. Лысенко Э.В. Проектирование автоматизированных систем управления технологическими процессами / Э.В. Лысенко. – М.: Радио и связь, 1987. – 271 с.

11. Буянов В.А. Автоматизированные информационные системы на железнодорожном транспорте / В.А. Буянов, Г.С. Ратин. – М.: Транспорт, 1984. – 239 с.
12. Раскин Л.Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления / Л.Г. Раскин. – М.: «Советское Радио», 1976. – 344 с.
13. Алиев Р.А. Производственные системы с искусственным интеллектом / Р.А. Алиев. – М.: Радио и связь, 1990. – 264 с.
14. Искусственный интеллект: Применение в интегрированных производственных системах / Под ред. Э. Кьюсиака. – М.: Машинстроение, 1991. – 544 с.
15. Поспелов Д.А. Ситуационное управление. Теория и практика / Д.А. Поспелов. – М.: Наука, 1986. – 288 с.
16. Нильсон Н. Искусственный интеллект. Методы поиска решений / Н. Нильсон. – М.: Мир, 1973. – 270 с.
17. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и её применение к принятию приближенных решений / Л.А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
18. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации / С.А. Орловский. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
19. Искусственный интеллект. В 3-х кн. Кн. 2. Модели и методы / Под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Радио и связь, 1990. – 368 с.
20. Захаров В.Н. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. Эволюция и принципы построения / В.Н. Захаров, С.В. Ульянов // Изв. РАН Техническая кибернетика. -1993. - №4. – С. 189 – 205.
21. Алиев Р.А. Управление производством при нечеткой исходной информации / Р.А. Алиев, А.Э. Церковный, Г.А. Мамедова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
22. Клыков Ю.И. Ситуационное управление большими системами / Ю.И. Клыков. – М.: Энергия, 1974. – 178 с.

23. Прикладные нечеткие системы / Под ред. Т. Терано, К.Асаи. – М.: Мир, 1993. – 386 с.
24. Earl Cox. The Fuzzy Systems Handbook A Pracktioner's Guide to Building. Using and Maintaining Fuzzy Systems / Cox. Earl. -- Boston: Academic Press, 1994. - 615 с.
25. Anderson C. Applying fuzzy logic the real word / C. Anderson // Sensor. -1992. -V.9, №9. - P. 117 - 141.
26. Романенко В.Д. Адаптивное управление технологическими процессами на базе микро - ЭВМ: Учебное пособие / В.Д. Романенко, Б.В. Игнатенко. - К.: Вища школа, 1990. -344 с.
27. Isermann R. Parameter - adaptive control with aids and supervision / R. Isermann, К-Н. Lahman // Automatica. - 1985. - Vol.21, №5. - С. 19 - 34.
28. Peel D. Adaptive control and artificial intelligence / D. Peel // Journal Automatic control. -1987. -Vol.287, №3. -P. 14 - 23.
29. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А.Пегат.- М.: Бином, 2009. – 798 с.
30. Weinberg G.M. An Introduction to General Systems Thinking / G.M. Weinberg. – New-York: Wiley - Intercience, 1975. - 416 p.
31. Цыпкин Я.З. Обучение и адаптация в автоматических системах / Я.З. Цыпкин. - М.: Наука, 1968. - 399 с.
32. Адаптивные автоматические системы / Под ред. Г.А. Медведева. - М.: Сов. Радио, 1972. -184 с.
33. Фомин В.Н. Адаптивное управление динамическими объектами / В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, В.А. Якубович. -М.: Наука, 1981. - 316 с.
34. Цыпкин Я.З. Основы теории обучающихся систем. - М.: Наука, 1970. - 318 с.
35. Шрейдер Ю.А. Системы и модели / Ю.А. Шрейдер, А.А. Шаров. - М.: Радио и связь, 1982. - 312 с.
36. Сарычев В.А. Радиоэлектронное обеспечение интеллектуального транспорта / В.А. Сарычев // Труды СПбГТУ.- 1998. -№472. - С. 72 - 81.

37. Анцев Г.В. Интеллектуальный транспорт и радиоэлектроника / Г.В. Анцев, В.А. Сарычев // Вопросы радиоэлектроники. -2000. - №1. - С. 21 - 30.
38. Небылов А.В. Гарантирование точности управления / А.В. Небылов. - М.: Наука, Физматлит, 1988. - 304 с.
39. Бесекерский В.А. Цифровые автоматические системы / В.А. Бесекерский. - М.: Наука, 1976. - 576 с.
40. Острем К. Системы управления с ЭВМ / К. Острем, Б. Витенмарк. - М.: Мир, 1987. - 480 с.
41. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. - М.: Мир, 1984. - 541 с.
42. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления / Б. Куо. - М.: Машиностроение, 1986. - 449 с.
43. Солодовников В.А. Микропроцессорные автоматические системы регулирования / В.А. Солодовников. - М.: Высшая школа, 1991. - 334 с.
44. Полищук В.П. Проектирование автоматизированных систем управление движением на автомобильных дорогах: Учебн. пособие / В.П. Полищук. - К.: УМК ВО, 1990. - 55 с.
45. Лигум Ю.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами пассажирского автомобильного транспорта / Ю.С. Лигум. - К.: Техника, 1989. - 239 с.
46. Макаров И.П. Автоматизация управления городским транспортом / И.П. Макаров, В.З. Ямпольский. - М.: Транспорт, 1981. - 256 с.
47. Месарович М. Такахара А. Общая теория систем: математические основы / М. Месарович, А. Такахара. - М.: Мир, 1973. - 300 с.
48. Начала информационной теории управления. Техническая кибернетика. / Под ред. Б.Н. Петрова. - М.: ВИНТИ, 1972. - С. 5 - 128.
49. Петров Б.Н. Информационные основы теории систем управления с обратными связями. Техническая кибернетика. / Б.Н. Петров, В.В. Петров, Г.М. Уланов. - М.: ВИНТИ, 1973. - С. 5 - 78.

50. Теленик С.Ф. Интеллектуализация транспортных технологий. / С.Ф. Теленик, Н.И. Гученко, О.П. Алексеев // Вестник ХНАДУ, - 2003. - Вып. - 20. - С. 84 - 86.
51. Denos C. Contribution of Traffic Theory Toward Development of Intelligent Transportation Systems / C. Denos // Transportation Systems. IFAC Symposium, China, Greece.-1997. - P. 1 - 12.
52. Horowitz R. Automated Highway systems / R. Horowitz // Transportation Systems. IFAC Symposium, China, Greece.- 1997. - P. 452 - 463.
53. Глушков В.М. Введение в АСУ / В.М. Глушков. - К.: Техніка, 1972. - 312 с.
54. Таненбаум Э. Распределённые системы. Принципы и парадигмы / Э. Таненбаум, М. Ван Стеен. - СПб.: Питер, 2003. - 877 с.
55. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахага. - М.: Мир, 1973. - 344 с.
56. Алексієв В.О. Новітня GRID - технологія для вирішення задач дослідження мехатронних систем / В.О. Алексієв // Вестник ХНАДУ. - Харьков. - 2007. - Вып. 38. - С. 111 - 113.
57. Эрлих А.И. Прикладная семиотика. – Новые возможности моделирования в системах управления / А.И. Эрлих // Сб. научн. тр. КИИ – 96. – Казань -1996. т 3. – С. 92 – 104.
58. Хомяком Д.М. Основы системного анализа / Д.М. Хомяком, П.М. Хомяком. – М.: Издат. МГУ, 1996. – 318 с.
59. Saridis G.N. Analytical design of intelligent machines / G.N. Saridis, K.P. Valavanis // Automatica. - 1988. - Vol. 24, № 2. - P. 12 - 19.
60. Saridis G.N. Analytical formulation of the principle of increasing precision with decreasing intelligence for intelligence machine / G.N. Saridis // Automatica. - 1989. - Vol. 25, № 4. - P. 31 - 40.
61. Valavanis K.P. Information theoretic modeling of intelligent systems / K.P. Valavanis, G.N. Saridis // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. - 1988. - Vol. 25, № 4. - P. 62 - 69.

62. Викентьев А.В. Системное управление. Проблемы и решения / А.В. Викентьев, З.А. Кучкаров, В.В. Михеев // Жел. дороги мира. – 2000. - № 8. – С. 31 – 39.
63. <http://www.inftech.webserwis.ru>
64. O’Keefe R.M. Expert system and operational research – Mutual benefits / R.M. O’Keefe // Journal of the Operational Research Society. – 1985. - №36(2). – P. 125-129.
65. Kusiak A. Artificial intelligence and operations research in flexible manufacturing systems / A. Kusiak // Information Processing and Operational Research. – 1987. - №25(1). – P. 1-12.
66. Бесекерский В.А. Динамический синтез систем автоматического регулирования / В.А. Бесекерский. – М.: Наука, 1976. – 680 с.
67. Бесекерский В.А. Робастные системы автоматического управления / В.А. Бесекерский, А.В. Небылов. – М.: Наука, 1983. – 240с.
68. Типовые линейные модели объектов управления / Под ред. Н.С. Райтмана. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.
69. Александров А.Г. Оптимальные и адаптивные системы / А.Г. Александров. – М.: Высшая школа, 1989. – 263 с.
70. Атанс М. Оптимальное управление / М. Атанс, П. Фалб. – М.: Машиностроение, 1968. – 764 с.
71. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием / Х. Гурецкий. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.
72. Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1977. – 308 с.
73. Теория систем с переменной структурой / Под. ред. С.В. Емельянова. – М.: Наука, 1970. – 593 с.
74. Принципы построения и проектирования самонастраивающихся систем управления / Под. ред. Б.Н. Петрова. – М.: Машиностроение. – 260 с.
75. Кунцевич В.М. Нелинейные системы управления с частотной модуляцией / В.М. Кунцевич, Ю.Н. Чеховой. – Киев: Техніка, 1970. – 339 с.

76. Лазарян В.А. Динамика транспортных средств. Избранные труды / В.А. Лазарян. - К.: Наукова думка, 1985. - 528 с.
77. Якубович В.А. Частотная теорема в теории управления / В.А. Якубович // Сибирский математический журнал. – 1973. – Т. 14- №2. – С. 384-420.
78. Смирнова В.В. Частотная теорема (лемма Якубовича – Калмана) в теории управления / В.В. Смирнова, А.Л. Фрадков // Автоматика и телемеханика. – 1996. - №10. – С. 3-20.
79. Кроновер Ф.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. / Ф.М. Кроновер. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
80. Колоколов Ю.В. Динамика и синтез регуляторов тока импульсных автоматизированных электроприводов /Ю.В.Колоколов, С.Л.Косчинский.- М.: Машиностроение-1, 2006.- 98 с.
81. Leonov G.A. Frequency Method in Oscillation Theory / G.A. Leonov, J.M. Burkin, A.J. Shepeljavyi. – Dordrecht: Kluwer, 1996. – 716 p.
82. Fradkov A.L. Introduction to Control of Oscillation and Chaos / A.L. Fradkov, A.Yu. Pogromsky. – Singapore: World Scientific, 1998. – 391 p.
83. Wiener N. Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series / N. Wiener. – New-York: Wiley, 1949. – 276 p.
84. Kalman R. E. New Results in Linear Filtering an Prediction Theory / R. E. Kalman, R. S. Bucy // N. I. Basic Eng. – 1961. – V83, N1. – P. 95 – 108.
85. Петров О.А. Линейная фильтрация случайных процессов. Учебное пособие / О.А. Петров, В.Н. Фомин. - Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1996. - 148 с.
86. Фомин В.Н. Операторные методы теории линейной фильтрации и случайных процессов / В.Н. Фомин. С. – Петербург: Изд-во С. – Петербургского гос. Университета, 1996. - 308 с.
87. Фомин В.Н. Оптимальная и адаптивная фильтрация / В.Н. Фомин. - СПб: изд-во С. – Петербургского университета, 2001. – 400 с.
88. Fomin V. Optimal Filtering: Filtering of Stochastic Processes / V. Fomin. - Kluwer Acad. Publ.,V. 481, 1998. - 375 p.

89. Saberi A. Filtering Theory with Applications to Fault Detection, Isolation and Estimation / A. Saberi, A.A. Stoorvogel, P. Sannuti. – Bostoni Birkhauser, 2007. – 723p.
90. Загарий Г.И. Синтез систем управления на основе критерия максимальной степени устойчивости / Г.И. Загарий, А.М. Шубладзе. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 104 с.
91. Сытник Б.Т. Синтез структуры и моделирования адаптивных цифровых фильтров и систем управления с нестационарными характеристиками. Часть 1./ Б.Т. Сытник, В.Б. Сытник // Інформаційні керуючі системи залізничного транспорту. – 2003. – №6. – С. 18 – 24.
92. Загарий Г.И. Адаптивная фильтрация сигналов в системах измерения и управления / Г.И. Загарий, С.В. Панченко, Б.Т.Сытник, В.А.Брыксин / Вісник Донецького національного університету, сер.А: Природничі науки. -2009. -Вип.1. – С. 496-499.
93. Загарий Г.И. Розробка методу адаптивної фільтрації сигналів для пристроїв керування рухомими одиницями/ Г.И.Загарий, С.В.Панченко, Б.Т.Ситнік, В.О.Бриксіні // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.- 2009.-№6.-С.32-37.
94. Якубович В.А. Об одном методе решения специальных задач глобальной оптимизации / В.А. Якубович // Вестник СПб. ун-та, Сер. 1. – 1992. – Вып. 2(N 8). – С.58-68.
95. Yakubovich V.A. Nonconvex optimization problem / V.A. Yakubovich // Systems and Control Letters. – 1992. – Vol.19. – P. 13 – 22.
96. Матвеев А.С. Абстрактная теория оптимального управления / А.С. Матвеев, В.А. Якубович. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 1994. – 361 с.
97. Барабанов А.Е. Оптимальное управление линейным объектом с ограниченной помехой / А.Е. Барабанов, О.Н. Граничин // Автоматика и телемеханика. – 1984. – N 5. – С. 39 – 46.

98. Cheremensky A. Operator Approach to Linear Control Systems / A. Cheremensky, V. Fomin. - Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers, 1996. – 419 p.
99. Андреев В.А. Синтез оптимальных управлений для дискретных систем в задаче минимизации квадратичного функционала / В.А. Андреев, А.И. Шепелявый // Elektronische Informtionverarbeitung und Kybernetik. – 1972. – N8/9. – С. 549 – 567.
100. Astroem K.I. Adaptive Control / K.I. Astroem, B. Wittenmark. – New-York: Wiley, 2008. –590 p.
101. Ioannou P. Adaptive Control Tutorial / P. Ioannou, B. Fidan. – Philadelphia: SIAM, 2006. – 387 p.
102. Фомин В.Н. Адаптивное управление динамическими объектами / В.Н. Фомин, А.Л. Фрадков, В.А. Якубович. - М.: Наука, 1981.- 448 с.
103. Деревицкий Д.П. Прикладная теория дискретных адаптивных систем управления / Д.П. Деревицкий, А.Л.Фрадков. - М.: Наука, 1981.
104. Фомин В.Н. Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация / В.Н. Фомин. - М.: Изд-во «Наука», 1984.-288 с.
105. Гелиг А.Х. Асимптотическая устойчивость нелинейных импульсных систем / А.Х. Гелиг // Автоматика и телемеханика- 2002.
106. Гелиг А.Х. Динамика систем с импульсной модуляцией / А.Х. Гелиг, А.Н. Чурилов. // Нелинейная теория управления: динамика, управление, оптимизация. -М.: Наука, 2001. -С. 314-341.
107. Wonham W.M. On the Separation theorem of stohastic control / W.M. Wonham // SIAMJ. Control. – 1968. – Vol. 6, N 2. – P. 312-326.
108. Gelig A. Kh. Stability and Oscillations of Nonlinear Pulse-Modulated Systems Birkham user / A. Kh. Gelig, A.N. Chyrilov. - Boston-Basel-Berlin, 1998.- 362 p.
109. Панченко С.В. Аналіз методів обробки сигналів колійними приймачами в рейкових колах, необмежених ізольованими стиками /С.В. Панченко,

А.О.Літвінов, В.М.Бутенко // Зб. наук. праць. – Х.: УкрДАЗТ. -2008. Вип. 92.-С.124-127.

110. Автоматизация электроподвижного состава / Под. ред. А.Н. Савоськина. – М.: Транспорт, 1990. – 311 с.

111. Баленко А.И. Математическая модель электропередачи дизель-поезда в режиме тяги / А.И. Баленко, Н.И. Заполовский, В.А. Пуйденко // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 1998. – Вып. 27. – С. 67-71.

112. Басов Г.Г. Розвиток електричного рухомого моторвагонного рухомого складу. Ч.2. / Г.Г. Басов, С.І. Яцько. – Х.: Алекс+, 2005. – 248 с.

113. Руденко В.Ф. Аналітичний синтез системі автоведення поезда / В.Ф. Руденко // Совершенствование конструкции локомотивов и системы их обслуживания.- 2004. – С. 110-116.

114. Носков В.И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / В.И. Носков, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, С.Ю. Леонов. – Х.: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 с.

115. Дмитриенко В.Д. Математические модели оптимальных систем управления тяговым асинхронным приводом тепловозов / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский // Электронное моделирование.–1991.–Т.13,№ 2.–С.40 – 44.

116. Капинус В.С. К вопросу синтеза оптимальных регуляторов электропривода тепловоза ТЭ120 / В.С. Капинус // Вестн. Харьк. политехн. ин-та: Автоматика и приборостроение. – 1986. - №235. – С.33-35.

117. Корниенко В.В. Высокоскоростной электрический транспорт. Мировой опыт / В.В. Корниенко, В.И. Омеляненко. – Х.: НТУ «ХПИ», 2007. -159 с.

118. Электропоезда нового поколения для железных дорог Германии // Железные дороги мира. – 2000. - №8. – С. 21 -30.

119. Блохин Е.П. Динамика поезда / Е.П. Блохин, Л.А. Манашкин. – М.: Транспорт, 1982. -228 с.

120. Блохин Е.П. От материальной точки до нелинейной пространственной многомассовой модели поезда / Е.П. Блохин, К.И. Железнов, Л.В. Урсуляк // Вісник Дніпропетровського університету залізничного транспорту. – 2009. - №30. – С. 36 – 47.

121. Манашкин Л.А. Развитие математических моделей динамики поезда в трудах В.А. Лазаряна и его учеников / Л.А. Манашкин // Вісник Дніпропетровського університету залізничного транспорту. – 2009. - №30. – С. 64-71.

122. Манашкин Л.А. Расчеты и испытания тяжеловесных поездов / Л.А. Манашкин, Е.Л. Стамблер и др. / Под ред. Е.П. Блохина. – М.: Транспорт, 1986. – 263 с.

123. Дитрих Я. Проектирование и конструирование: Системный поход / Я. Дитрих. - М.: Мир, 1981. -456 с.

124. Юдин Э.Г. Системный поход и принцип деятельности / Э.Г. Юдин. - М.: Наука, 1978. -314 с.

125. Основы системного похода и их приложение к разработке территориальных автоматизированных систем управления / Под ред.. Ф.И. Перегудова. - Томск: ТГУ, 1976.- 244 с.

126. Данько М.І. Мікропроцесорна диспетчерська централізація "Каскад". /М.І.Данько, В.І.Мойсеєнко, В.З.Рахматов, В.І.Троценко, М.М.Чепцов. –Х.: УкрДАЗТ, 2005.- 176 с.

127. [http:// www. mkg. ru/lib/sp230103/aiczd/grp/128](http://www.mkg.t.ru/lib/sp230103/aiczd/grp/128). Автоматизированная система ведения и анализа графика исполненного движения (ГИД Урал – ВНИИЖТ).

128.Розенберг Е.Н. Многоуровневая система управления и обеспечения безопасности движения поездов / Е.Н. Розенберг, В.И.Талалаев // Транспортная безопасность и технологии. -2005. -№1. -С.16 - 21.

129. Вопросы теории эксплуатации автоматизированных транспортных систем управления / Под ред. Л.Г.Раскина. -Х.: Издательство военного университета, 2000. -266с.

130. Современные технологии на железнодорожном транспорте / Под ред. Б.И. Макаренко, Л.А. Исаева. -Х.: Издательство военного университета, 2000. -220с.
- 131.Зверев В.И. Автоматизированные системы управления на железнодорожном транспорте / В.И.Зверев, А.С. Коляда. -М.: МГУПС, 2007. -210 с.
132. Панченко С. В. К вопросу оптимизации обслуживания сложных систем управления/ С.В. Панченко, Н.Г. Панченко// Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – №3. – С. 37-39.
133. Основы моделирования сложных систем / Под. ред. И.В. Кузьмина. – К.: Вища школа, 1981. – 360 с.
134. Сингх М. Системы: декомпозиция, оптимизация и управление / М. Сингх, А. Титли. – М.: Машиностроение, 1986. – 496 с.
135. Эшби У.Р. Введение в кибернетику / У.Р. Эшби.– М.: ИЛ, 1959.–432 с.
136. Valk R. Petri Nets for Systems Engineering / R. Valk. - New-York: Springer, 2002. – 607 p.
137. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Дж. Питерсон. – М.: Мир, 1984. – 235 с.
138. Кьюсиак Э. Искусственный интеллект: применение в интегрированных производственных системах / Э. Кьюсиак. – М.: Машиностроение, 1991. – 544 с.
139. Филлипс Д. Методы анализа сетей / Д.Филлипс, А. Гарсия-Диас. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
140. Петренко Т.Г. Интеллектуальная система управления скоростью ро составов на горках / Т.Г. Петренко // Контроль і управління в технічних ситемах (КУТС-97) / Матеріали четвертої міжнародної НТК, Вінниця, 21 -23 жовт ня 1997. Том 3. – Вінниця: "УНІВЕРСУМ –Вінниця", 1997. – С.180-184.
141. Jensen K. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems / K. Jensen. - New-York: Springer, 2009. – 384 p.

142. Реклейтис Г. Оптимизация в технике. Кн.2. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Регсдейл. – Мир, 1986. – 320 с.
143. Гэри М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. Джонсон. – М.: Мир, 1982.- 411 с.
144. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход / Н. Кристофидес.- М.: Мир,1978 .- 432 с.
145. Пападимитриу Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность/ Х.Пападимитриу, К.Стаглиц. – М.: Мир, 1985.- 510 с.
146. Кормен Т. Алгоритмы, построение и анализ / Т. Кормен, Ч. Лейзерсон, Р. Риверс. - МЦНМО Москва, 2002.- 955 с.
147. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений / П. Фишберн. – М.: Наука, 1978. – 352 с.
148. Кухтенко А.И. О Теории сложных систем с иерархической структурой управления / А.И. Кухтенко // Сложные системы управления. – К.: Издательство АН УССР, 1966. – С. 19 – 37.
149. Нильсон Н. Искусственный интеллект. Методы поиска решений / Н. Нильсон. – М.: Мир, 1973. -270 с.
150. Волкович В.Л. Исследования процедур поддержки принятия решений в автоматизированных системах / В.Л. Волкович // Зб. научн. тр. ИК АН УССР. – К.: ИК АН УССР, 1989. – С. 148 – 174.
151. Загарій Г. І. Критерій якості ухвалення рішення по керуванню в складній ієрархічній системі / Г. І. Загарій, С.В. Панченко, Б.Т. Ситнік, В. А. Бриксін // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. - № 3. – С. 54-58.
152. Панченко С.В. Доказательство существования функционального перехода в расширенных сетях Петри / С.В. Панченко, А. А. Мелихов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2005. – №1,2. – С. 84-91.
153. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ – Петербург, 2003. – 736 с.

154. Cohen C. Algebraic tools for the performance evaluation of discrete event systems / C. Cohen, P. Moller, J.-P. Quadrat, M. Viot // Proceedings of the IEEE. – January 1989. – Vol. 77, №. 1. – P. 30-53.

155. Федюшин Ю.М. Сети Петри. Применение и состояние теории (обзор) / Ю.М. Федюшин // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 1997. -№1.- С.25 – 27.

156. Гусев И.В. Семиотический анализ сетей Петри и его расширений / И.В. Гусев, Н.И. Данько, Г.И. Загарий, Н.И. Луханин, В.В. Матейченко, О.Ф. Михаль // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. – 2000. -№ 6. – С. 54 58.

157. Загарий Г. И. Алгебра сетей Петри. Часть 1. Расширение – квазидвунаправленность для моделирования динамических ситуаций передачи ресурса (меток) / Г. И. Загарий, С.В. Панченко, Б.Т. Ситнік // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2008. – №1. – С. 76-83.

158. Панченко С. В. К построению квазидвунаправленных сетей Петри / С. В. Панченко // Збірник наукових праць ДонІЗТ.- 2008. – №14.- С. 90-93.

159. Панченко С.В. Критерії оптимізації транспортних систем / С.В.Панченко // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції "Сучасні інформаційні технології на транспорті, промисловості та освіті (м. Дніпропетровськ, травень 2009). –С.92.

160. Загарий Г.И. Алгебра сетей Петри. Часть 2. Расширения - квазидвунаправленные простые и сложные функциональные переходы нечетких МП / Г.И.Загарий, С.В.Панченко, Б.Т.Ситнік, В.О.Бриксин // Зб. наук. праць.-Донецьк: ДонІЗТ, 2009.-Вип.20. –С.16-38.

161. Каргин А.А. Об использовании нечетких знаний в задачах управления движением поездов. Часть 1. Продукционные модели знаний на основе нечетких множеств / А.А.Каргин // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте.- 1996.-№ 6.– С. 180 – 184.

162. Kamal A.S. Hybrid logic-dynamic model problems of the complex transport systems / A.S. Kamal, A.A. Kargin, B.T. Sytnik, A. Rahman // Радиоэлектроника и информатика. – 2000. -№1. – С. 63 – 66.

163. Сытник Б.Т. Организация продукционных баз знаний в ситуационных системах / Б.Т. Сытник , А.И.Караван//Радиоэлектроника и информатика. – 2000. - №3. – С. 64 - 67.

164. http://uk.wikipedia.org/wiki/Південна_залізниця

165. Модин Н.К. Техническое обслуживание горочных устройств / Н.К.Модин, Е.В.Щербаков.– М.: Транспорт, 1989. – 167 с.

166. Каргин А.А. Об использовании нечетких моделей знаний в задачах управления движением поездов. Ч.2. Структурированные декларативные и процедурные знания в продукционных системах / А.А. Каргин, Б.Т. Сытник // Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте. -1997. -№1.- С.40-44.

167. Захаров В.Н. Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и системы управления. I. Научно-организационные, технико-экономические и прикладные аспекты / В.Н. Захаров, С.В. Ульянов // Изв. РАН. Техническая кибернетика. -1992.-№5, - С.171-204.

168. Писарев А.Л. Управление тиристорными преобразователями / А.Л. Писарев, Л.П Деткин. – М.: Энергия, 1975.– 264 с.

169. Быков Ю.М. Помехи в системах с вентильными преобразователями / Ю.М. Быков, В.С. Василенко. - М.: Энергоатомиздат, 1986.- 152 с.

170. Небылов А.В. Гарантирование точности управления / А.В. Небылов. – М.: Наука, Физматлит, 1988. – 304 с.

171. Панченко С.В. Моделирование динамических ситуаций перевозок на основе нового расширения сетей Петри – квазидвунаправленности дуг и переходов / С.В. Панченко // Сборник материалов Сессии "Информационно-вычислительные технологии в решении фундаментальных и прикладных научных задач", ИВТН -2008 (г. Москва, декабрь 2008), С.54.

172. Кравцов Ю.А. Вероятностная модель поездного шунта для легких подвижных единиц и отцепов / Ю.А. Кравцов, Б.М. Степенский, В.М. Баранников // Совершенствование и повышение надежности железнодорожных систем автоматики основе, телемеханики и связи. – Межвузовский сборник научных трудов Московского института инженеров железнодорожного транспорта, 1990.- С. 24-29.

173. Пенкин Н.Ф. Рельсовые цепи переменного тока с дроссель-трансформаторами / Н.Ф. Пенкин. - М.: Трансжелдориздат, 1953.- 144 с.

174. Скрыпин И.З. Измерение электрических параметров рельсовых линий / И.З. Скрыпин, Ю.В. Соболев, Ф.Д. Лист // Автоматика, телемеханика и связь.- 1967.- №4.- С.20-22.

175. Деев А.М. Испытана новая система защиты ТРЦ / А.М. Деев // Автоматика, связь, информатика.- 2003.- №11.- С 42-43.

176. Кравцов Ю.А. О влиянии на рельсовые цепи электрической дуги на токосъемнике электровоза при гололедообразовании / Ю.А. Кравцов, А.П. Разгонов, Ю.И. Зенкович// Автоматика, связь, информатика.-1999.-№8.-С.2-4.

177. Панченко С.В. Анализ факторов оказывающих воздействия на микропроцессорные путевые приемники бесстыковых рельсовых цепей / С.В. Панченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. - 2006.- №2.- С 22-25.

178. Корепанов Г.Я. Бесконтактное снятие потенциальных диаграмм на коллекторах тяговых двигателей / Г.Я. Корепанов // Труды МИИТ, вып. 157. -М.: Трансжелдориздат МПС, 1962. -С. 100-111.

179. Хвостов В.С. Электрические машины. Машины постоянного тока / В.С. Хвостов. - М.: Высшая школа, 1988.- 336 с.

180. Кравчук В.В. Помехи, вызванные тяговыми двигателями с компенсационной обмоткой в низкочастотном диапазоне / В.В. Кравчук // Труды МИИТ, вып. 353. - М.: Транспорт, 1971.- С.86-93.

181. Муха А.Н. Помехоустойчивость релейной аппаратуры электроподвижного состава, построенной с применением современной

элементной базы / А.Н. Муха // Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту.- 2001. - Вип. 7.- С. 79-85.

182. Панченко С. В. Особливості та напрямки удосконалення мікроелектронних закордонних систем автоблокування на ділянках залізниць/ С. В. Панченко, Н.Г. Панченко, М.І. Данько // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – №1. – С. 3-8.

183. Панченко С. В. Принцип диагностирования микропроцессорных рельсовых цепей / С.В. Панченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – №1. – С. 61-65.

184. Панченко С. В. Анализ помех, создаваемых электроподвижным составом в рельсовых линиях / С.В. Панченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – №3. – С. 46-50.

185. Щербак Я.В. Замкнутые системы компенсации неканонических гармоник полупроводниковых преобразователей / Я.В. Щербак. - Харьков: ХФИ "Транспорт Украины", 1999. –256с.

186. Щербак Я.В. Параметрическое формирование процесса конечной длительности в системах с полупроводниковыми преобразователями / Я.В. Щербак // Вестн. ХГПУ. Электроэнергетика и преобразовательная техника. – 1999. – Вып.69. –С.15-21.

187. Щербак Я.В. Синтез системы регулирования инвариантных контурам подавления субгармонических составляющих / Я.В. Щербак, В.И. Дрозд, В.Н. Козачек // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.-2004. - №3 – С.62–65.

188. Панченко С. В. Методы определения оценок параметров случайных величин / С.В. Панченко, Н.Г. Панченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2004. – №6. – С. 63-67.

189. Панченко С. В. Анализ методов контроля состояния рельсовых линий / С.В. Панченко, Н.Г. Панченко// Вісник НТУ «ХП»: Автоматика та приладобудування. – Х.: НТУ «ХП».- 2005. - №7.- С. 130-136.

190. Панченко С. В. До питання вдосконалення методів контролю стану рейкових ліній / С.В. Панченко, Н.Г. Панченко// Вісник НТУ «ХП»: Автоматика та приладобудування. – Х.: НТУ «ХП».- 2005. - №17. - С. 77-82.

191. Панченко С. В. Застосування теорії розпізнавання образів для визначення стану колійних ділянок / С.В. Панченко// Збірник наукових праць. – Х.: УкрДАЗТ. - 2005. – Вип. 71.- С. 108-116.

192. Тикменев Б.Н. Подвижной состав электрифицированных железных дорог. Теория работы электрооборудования. Электрические схемы и аппараты. Учебник для вузов ж.д. трансп.-4-е изд. / Б.Н. Тикменев, Л.М. Трахтман. - М.: Транспорт, 1980.-471с.

193.Панченко С. В. Методи моделювання систем управління процесом перевезень. Частина 1.Агрегативні системи. Мережі Петрі / С.В. Панченко, С.Л. Пархоменко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – №4. – С. 69-73.

194. Гудвин Г.К. Проектирование систем управления / Г.К.Гудвин, С.Ф.Гребне, М.Э. Сальгадо.-М.: БИНОМ – лаборатория знаний, 2004. -911 с.

195. Загарий Г.И. Синтез адаптивных дискретных регуляторов для подвижных объектов с распределенными параметрами и запаздыванием/ Г.И.Загарий, С.В.Панченко, Б.Т.Сытник, В.А. Брыксин. // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2009. – №5. – С. 44-55.

196. Ядыкин И.Б. Адаптивное управление непрерывными технологическими процессами / И.Б. Ядыкин.-М.: Энергоатомиздат, 1985.-240 с.

197. Небылов А.В. Гарантирование точности управления/ А.В. Небылов.-М.: Наука, Физматлит, 1998.- 304с.

198. Колоколов Ю.В. Динамика и синтез регуляторов тока импульсных автоматизированных электроприводов/ Ю.В. Колоколов, С.Л.Косчинский.-М.: Машиностроение-1, 2005.-98с.
199. Нетушил А. В. Теория автоматического управления./ Под ред. А.В. Нетушила. / Учебник для вузов. Изд. 2-, доп. – М.: Высш. шк., 1976. – 400 с.
200. Коломейцева М.Б. Переходные процессы в системах автоматического регулирования с иррациональной передаточной функцией / М.Б. Коломейцева, А.В. Нетушил. - Автоматика и телемеханика.- 1965.- т.26.- №2-С. 359-364.
201. Деч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и Z-преобразования / Г.Деч .-М.:Наука.1971.-288с.
202. Вилькевич Б.И. Автоматическое управление электрической передачей тепловоза и электрические схемы тепловозов / Б.И. Вилькевич. – М.: Транспорт. –1987.-272с.
203. Янушевский Р.Т. Управление объектами с запаздыванием / Р.Т. Янушевский.- М.: Наука,1978.-410с.
204. Zhong Q-C. Robust Control of Time-delay Systems/Q-C. Zhong.- London:Springer, 2006.-242 p.
205. Normey-Rico J. E. Control of Dead-time Processes/ J. E. Normey-Rico – London: Springer, 2007. – 462 p.
206. Feng G. Adaptive control systems / G. Feng, R. Lorano. – New-York: Springer, 1999. – 352 p.
207. Parks P.C. Applications of adaptive control systems / P.C. Park, W. Schaufelberger, C. Schmid. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1980. – 246 p.
208. Панченко С. В. Моделирование адаптивных дискретных систем. Оптимизация параметров управляющих импульсных последовательностей нечетких регуляторов / С.В. Панченко, Б.Т. Ситнік, С. И. Яцко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2006. – №4. – С. 69-73.
209. Кику А.Г. Адаптивные системы идентификации / А. Г. Кику,

В. И. Костюк, В. Б. Краскевич, А.М. Сильвестров, С.В. Шпит. – К.: Техника, 1975. -284 с.

210. Дейч А.М. Методы идентификации динамических объектов / А.М. Дейч. – М.: Энергия, 1979. – 240с.

211. Цыпкин Я.З. Информационная теория идентификации / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, Физматмет, 1997. – 367 с.

212. Панченко С. В. Застосування електромагнітних параметричних пристроїв в мережах живлення мікропроцесорних систем управління / С. В. Панченко, Н.Г. Панченко// Збірник наукових праць: Серія «Транспортні системи і технології».- К.: КУЕТТ. - 2004. – Вип. 6. – С. 111-117.

213. Панченко С. В. До питання надійного забезпечення електроживленням мікропроцесорно-релейних систем управління залізничного транспорту/ С.В. Панченко, Н.Г. Панченко// Збірник наукових праць. – Х.: УкрДАЗТ, 2004. – Вип. 57.- С. 103-109.

214. Панченко С. В. К вопросу определения параметров негауссовых случайных величин / С.В. Панченко, Н. Г. Панченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2005. – №3. – С. 36-38.

215. Панченко С. В. Использование метода максимизации полинома для более точного определения параметров информационных признаков сигналов / С.В. Панченко // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2005. – №6. – С. 85-88.

216. Панченко С.В. Спосіб контролю вільного стану рейкової лінії / С.В. Панченко, К.А. Трубочанінова, Ю.М. Панченко, В.І. Мойсеєнко// Патент на винахід UA 75979 B61L23/00.- Бюл. №6, 15.06.2006.

217. Панченко С. В. Спосіб контролю вільного стану рейкової лінії / С.В. Панченко, К.А. Трубочанінова, Ю.М. Панченко// Патент на винахід UA 75979 B61L23/00.- Бюл. №7, 17.07.2006.

218. Демченко Ф. О. Методи керування об'єктами забезпечення транспортної діяльності на залізничному транспорті (Огляд). Частина 1.

Керування виконавчими пристроями / Ф. О. Демченко, С. В. Панченко // Збірник наукових праць ДонІЗТ.- 2007. – №11.- С. 42-49.

219. Панченко С. В. Модель ситуаційної системи керування гальмовою позицією на спускній частині гірки в середовищі MATLAB 6.5 / С.В. Панченко, Б.Т. Ситнік, К.О. Запара// Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – 2007. – №2. – С. 56-62.

220. Панченко С.В. Интеллектуальные системы диспетчерского контроля и управления для железных дорог / С.В.Панченко // Материалы 20-й международной научно-практической конференции "Перспективные системы контроля и управления на железнодорожном транспорте (г.Алушта, Крым, 2007) // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. -2007.-№4(додаток).-С.49-51.

221. Панченко С.В. Синтез структури удосконалення локомотивних приймачів пристроїв АЛСН / С.В. Панченко, М.С. Кошевий // Зб. наук. праць. –Х.: УкрДАЗТ. -2009.-Вип.211.-С. 303-317.

222. Панченко С.В. Організація управління рухомими об'єктами залізничного транспорту на основі адаптації та нейронних мереж / С.В. Панченко // Тези доповідей 1-ої міжнародної конференції "Ресурсозберігаючі технології в експлуатації засобів транспорту в умовах реформування залізниць України" (м.Євпаторія, Крим, Україна, травень 2007 р.). – Х.: УкрДАЗТ, – 2007.– С. 25-26.

223. Панченко С. В. Моделирование динамических ситуаций перевозок на основе нового расширения сетей Петри – квазидвунаправленности дуг и переходов / С.В. Панченко // Сборник материалов Сессии "Информационно-вычислительные технологии в решении фундаментальных и прикладных научных задач", ИВТН – 2008 (г. Москва, декабрь 2008). – С.39.

224. Панченко С.В. До питання про технічну можливість, перспективи та проблеми впровадження мікропроцесорних систем управління рухом поїздів / С.В.Панченко, Н.Г.Панченко, М.І.Данько // Тези доповідей міжнародної

конференції з управління "Автоматика – 2002".-Донецьк: ДНУ, 2002. – Т.2.-С.73-74.

225. Панченко С.В. Система интервального регулирования движения поездов на перегонах / А. Б. Бойник, С. В. Кошевой, В. А. Сотник, С. В. Панченко: Учебное пособие для ВУЗов. – Х.: УкрГАЖТ, 2006. – 256 с.

226. Панченко С. В. Теоретичні основи проектування комп'ютерно-інтегрованих систем транспортних засобів. Книга 1. Диференціальні перетворення для комп'ютерного моделювання керуючих систем / В. Л. Баранов, А. А. Засядько, С. В. Лістровий, С. В. Панченко: Підручник для ВНЗ. – Х.: ПП Видавництво "Нове слово", 2007. – 176 с.

227. unian.net/rus/products-61281.html. Зарубежные системы ведения графика исполненного движения.

228. Типовые линейные модели объектов управления / Под. ред. Н.С. Райбмана.-М.: Энергоатомиздат, 1983.-264 с.

229. Панченко С.В. Контроллеры и процессоры с параллельной архитектурой: Учебник для ВУЗов. / И. А. Фурман, В. А. Краснобаев, М. Л. Малиновский, С. В. Панченко /Под ред.Г.И. Загария.- Х.: УкрГАЖТ, 2006. – 416 с.

Додаток А

Приклад нечіткої моделі регулювання швидкості рухомої одиниці

Спираючись на розглянутий вище метод нечіткого висновку, створимо нечітку модель регулювання швидкості руху рухомої одиниці. Для цього визначимо набори вхідних та вихідних параметрів системи нечіткого висновку, що представляють собою лінгвістичні змінні; терм-множини (множини значень) вхідних та вихідних лінгвістичних змінних; функції приналежності лінгвістичних змінних.

До вхідних параметрів моделі, що розглядається, належать:

- «*НАПОВНЕННЯ*» – інформація про наповнення рухомої одиниці пасажирями, позначимо його як β_1 , терм-множиною β_1 є множина $T_1 = \{\text{Порожнє, Мале Середнє, Велике, Критичне}\}$, або у скороченому вигляді $T_1 = \{P, M, S, V, K\}$;
- «*ГРАФІК*» – відповідність положення рухомої одиниці графіку руху, позначимо його β_2 , терм-множина $T_2 = \{\text{Відставання Значне, Відставання Помірне, Оптимально, Випередження Помірне, Випередження Значне}\}$, скорочено $T_2 = \{VdZ, VdP, O, VpP, VpZ\}$;
- «*ТЕХНІЧНИЙ СТАН*» – технічний стан рухомої одиниці, позначимо його β_3 , терм-множина $T_3 = \{\text{Незадовільний, Задовільний, Оптимальний}\}$, скорочено $T_3 = \{N, Z, O\}$.

Вихідним параметром моделі є «*ШВИДКІСТЬ РО*» – швидкість рухомої одиниці, позначимо її як ω_1 . Змінна ω_1 визначається наступною терм-множиною $T = \{\text{Мінімальна, Мала, Середня, Велика, Максимальна}\}$, скорочено $T = \{Min, Ml, S, V, Max\}$.

Складемо базу правил нечіткої продукції для моделі, що розглядається. В цих правилах визначимо стан вихідної змінної в залежності

ПРАВИЛО_56: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow V \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VpP \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow Z \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow S \rangle$

ПРАВИЛО_57: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow V \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VpP \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow O \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow S \rangle$

ПРАВИЛО_58: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow V \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VpZ \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow N \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow Min \rangle$

ПРАВИЛО_59: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow V \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VpZ \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow Z \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow Ml \rangle$

ПРАВИЛО_60: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow V \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VpZ \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow O \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow Ml \rangle$

ПРАВИЛО_61: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VdZ \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow N \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow Min \rangle$

ПРАВИЛО_62: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VdZ \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow Z \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow V \rangle$

ПРАВИЛО_63: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VdZ \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow O \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow Max \rangle$

ПРАВИЛО_64: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VdP \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow N \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow Min \rangle$

ПРАВИЛО_65: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VdP \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow Z \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow V \rangle$

ПРАВИЛО_66: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VdP \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow O \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow Max \rangle$

ПРАВИЛО_67: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow O \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow N \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow Min \rangle$

ПРАВИЛО_68: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow O \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow Z \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow V \rangle$

ПРАВИЛО_69: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow O \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow O \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow V \rangle$

ПРАВИЛО_70: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VpP \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow N \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow Min \rangle$

ПРАВИЛО_71: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VpP \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow Z \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow S \rangle$

ПРАВИЛО_72: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VpP \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow O \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow S \rangle$

ПРАВИЛО_73: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VpZ \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow N \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow Min \rangle$

ПРАВИЛО_74: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VpZ \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow Z \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow Ml \rangle$

ПРАВИЛО_75: ЯКЩО $\langle \beta_1 \rightarrow K \rangle$ I $\langle \beta_2 \rightarrow VpZ \rangle$ I $\langle \beta_3 \rightarrow O \rangle$, ТО $\langle \omega_1 \rightarrow Ml \rangle$

Після розробки бази правил можемо перейти безпосередньо до нечіткого моделювання процесу регулювання швидкості. Розробку будемо проводити за допомогою інтегрованої середовища MatLab 6.5 та пакету Fuzzy Logic ToolBox, що входить до її складу [153].

На вхід системи нечіткого висновку у моделі, що розглядається, подаються вхідні змінні «НАПОВНЕННЯ», «ГРАФІК», «ТЕХНІЧНИЙ СТАН», що вже пройшли нормалізацію, фаззифікацію і представлені у вигляді трикутних термів. Система прийняття рішення відповідно до

стану нечітких вхідних змінних, спираючись на алгоритм нечіткого висновку Мамдані та визначену базу правил нечіткої продукції, визначає значення вихідної змінної. На рис.А.1 зображено зовнішнє представлення нечіткої моделі у редакторі FIS Editor пакету Fuzzy Logic Toolbox інтегрованої середи розробок MatLab 6.5.

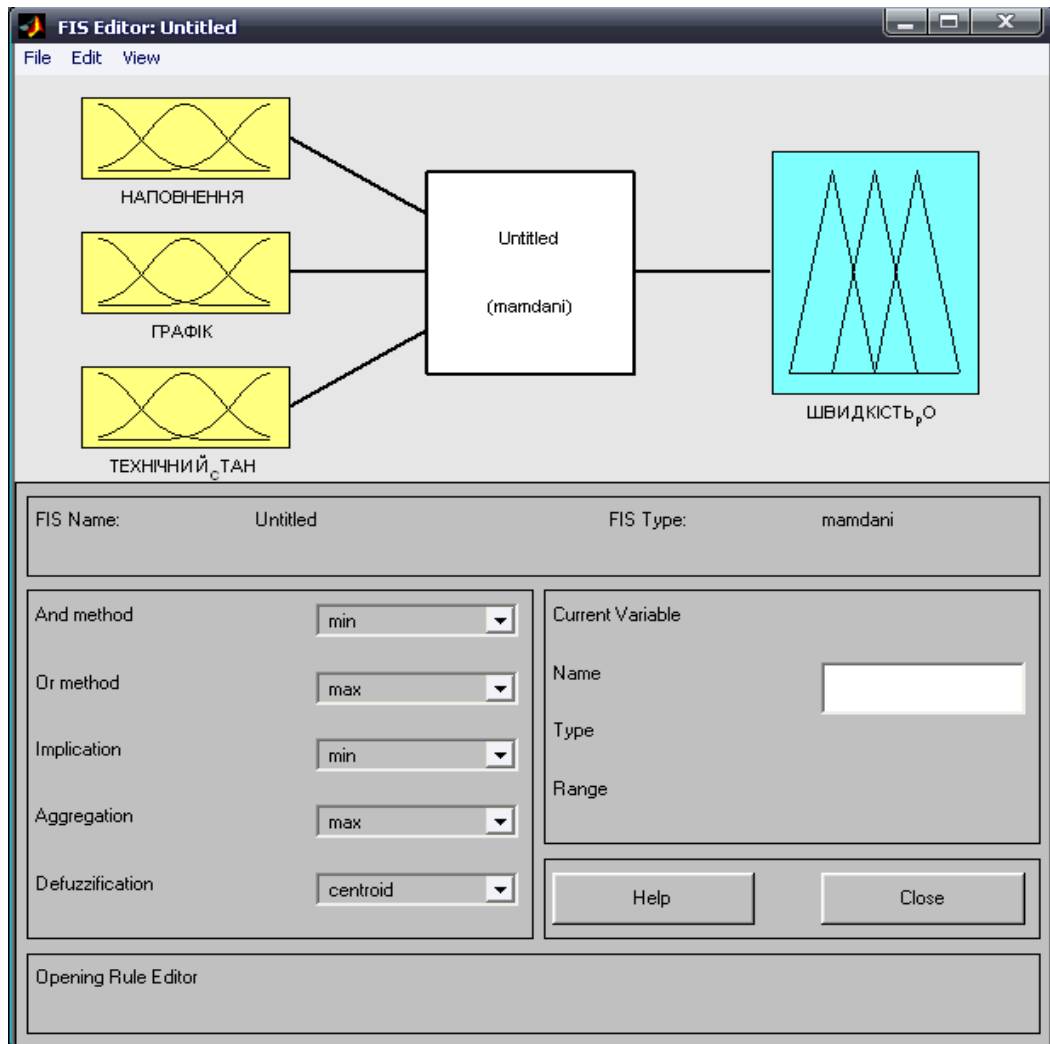


Рис. А.1. Загальний вигляд нечіткої моделі

Залишимо без зміни запропоновані системою MatLab за замовчуванням: метод нечіткого логічного І (And method) – значення “min”, метод нечіткого логічного АБО (Or method) - значення ”max”, метод імплікації (Implication) – значення “min”, метод агрегування (Aggregation) - значення ”max” і метод дефазифікації (Defuzzification) - значення “centroid”.

Визначимо терми та функції приналежності послідовно для кожної

вхідної змінної.

Значення вхідної лінгвістичної змінної «*НАПОВНЕННЯ*» змінюється від 0 до 180 осіб. Терм-множина цієї змінної складається з п'яти термів трикутної форми (trimf): *Порожнє* – P [0 30], *Мале* – M [0 40 80], *Середнє* – S [40 90 140], *Велике* – V [100 140 180], *Критичне* – K [150 180]. На рисунку А.2 зображені функції приналежності термів нечіткої змінної «*НАПОВНЕННЯ*».

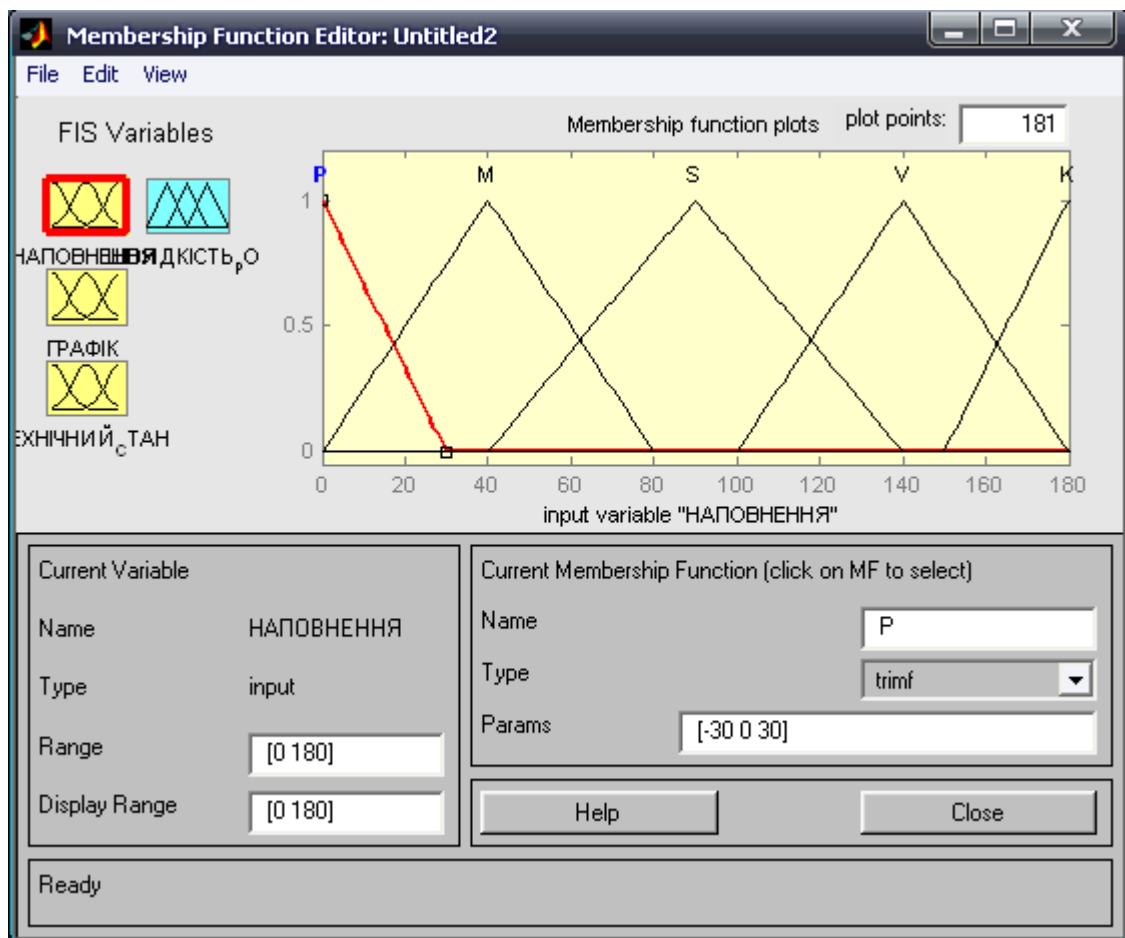


Рис. А.2. Функції приналежності термів нечіткої змінної «*НАПОВНЕННЯ*»

Значення вхідної лінгвістичної змінної «*ГРАФІК*» змінюється від -30 до +30 хвилин. Терм-множина цієї змінної складається з п'яти термів трикутної форми (trimf): *Відставання Значне* – VdZ [-30 -20], *Відставання Помірне* – VdP [-30 -15 0], *Оптимально* – O [-10 0 +10], *Випередження Помірне* – VpP [0 +15 +30], *Випередження Значне* – VpZ [+20 +30]. На рис.

А.3 зображені функції приналежності термів нечіткої змінної «ГРАФІК».

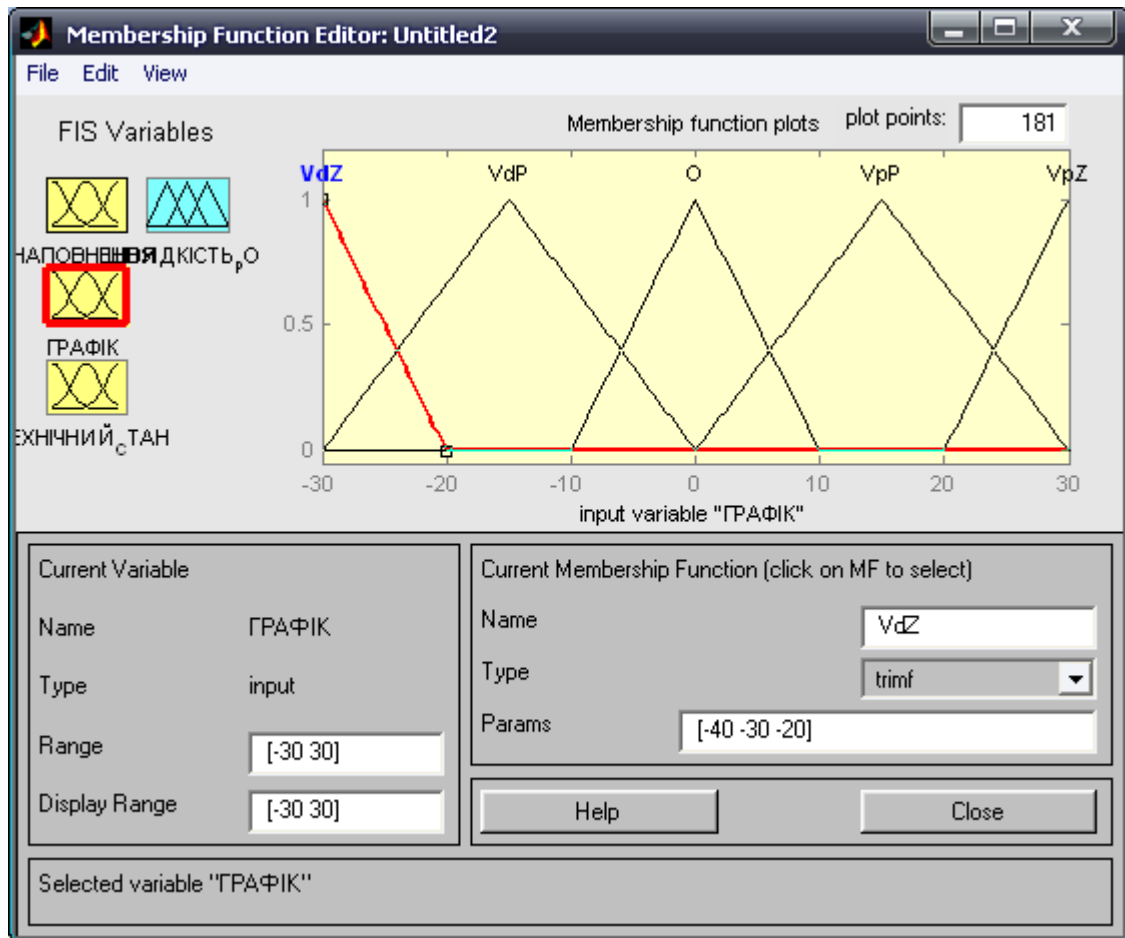


Рис. А.3. Функції приналежності термів нечіткої змінної «ГРАФІК»

Значення вхідної лінгвістичної змінної «ТЕХНІЧНИЙ СТАН» змінюється від 0 до 1 відносних одиниць. Терм-множина цієї змінної складається з трьох термів трикутної форми (trimf): *Незадовільно* – N [0 0.4], *Задовільно* – Z [0.1 0.5 0.9], *Оптимально* – O [0.6 1]. На рисунку А.4 зображені функції приналежності термів нечіткої змінної «ТЕХНІЧНИЙ СТАН».

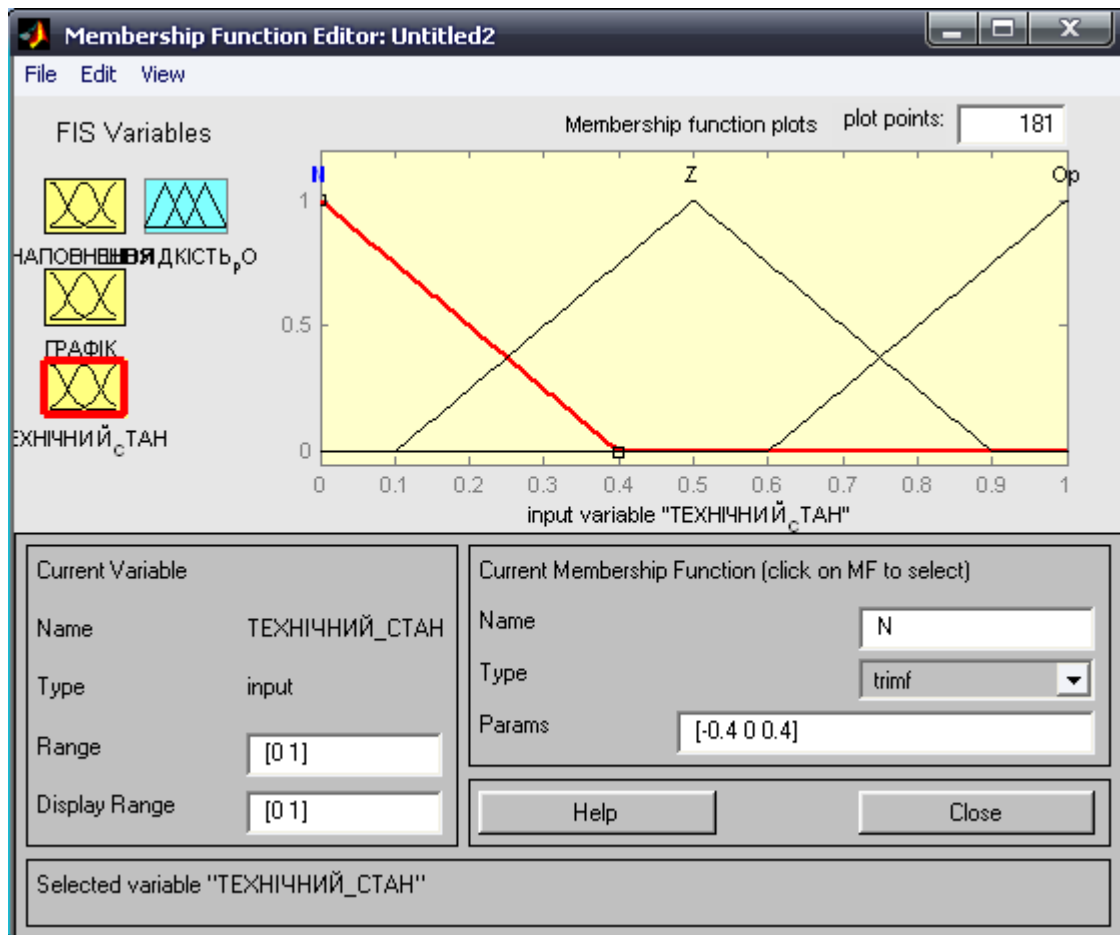


Рис. А.4. Функції приналежності термів нечіткої змінної «*ТЕХНІЧНИЙ СТАН*»

Визначимо терми та функції приналежності для вихідної змінної. Значення вихідної лінгвістичної змінної «*ШВИДКІСТЬ РО*» змінюється від 0 до 60 км/год. Терм-множина цієї змінної складається з п'яти термів трикутної форми (trimf): *Мінімальна* – Min [0 10], *Мала* – M1 [0 15 30], *Середня* – S [20 30 40], *Велика* – V [30 45 60], *Максимальна* – Max [50 60]. На рис. А.5 зображені функції приналежності термів нечіткої змінної «*ШВИДКІСТЬ РО*». Як було зазначено вище, значення цієї змінної обчислюється на основі визначених продукційних правил. Для моделі, що розглядається, в редакторі правил були записані всі 75 необхідних правил. На рис. А.7 представлений результат нечіткого висновку значенні вихідної нечіткої змінної «*ШВИДКІСТЬ РО*».

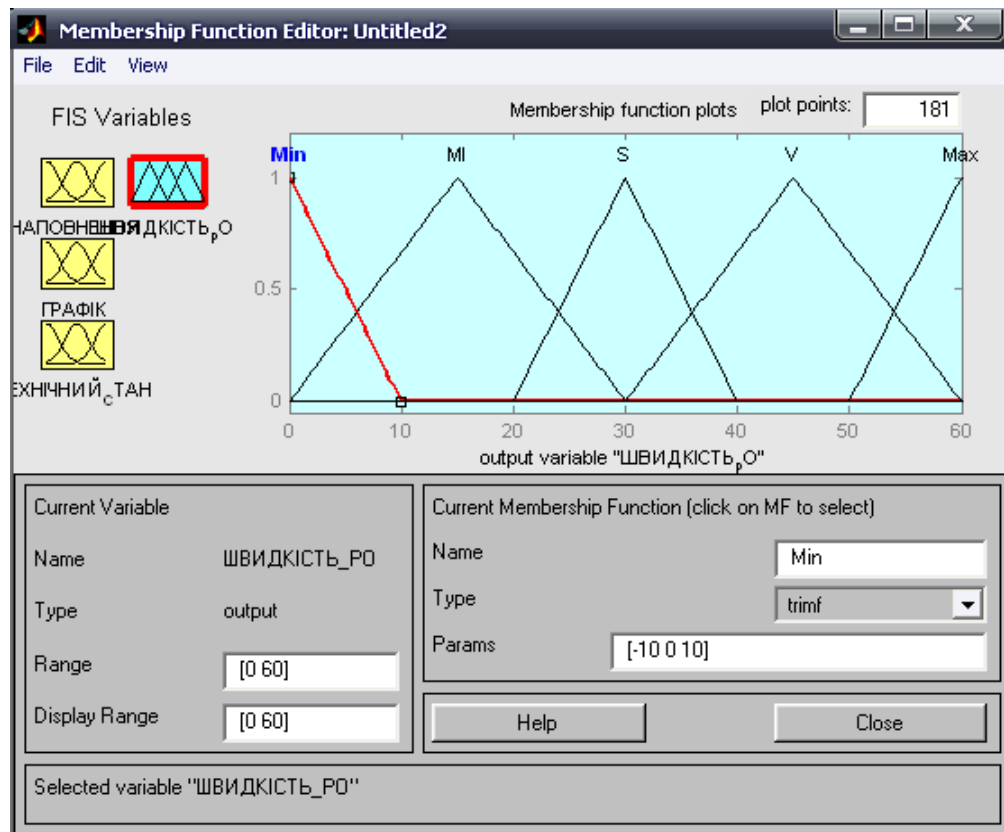


Рис. А.5. Функції приналежності термів нечіткої змінної «ШВИДКІСТЬ РО»

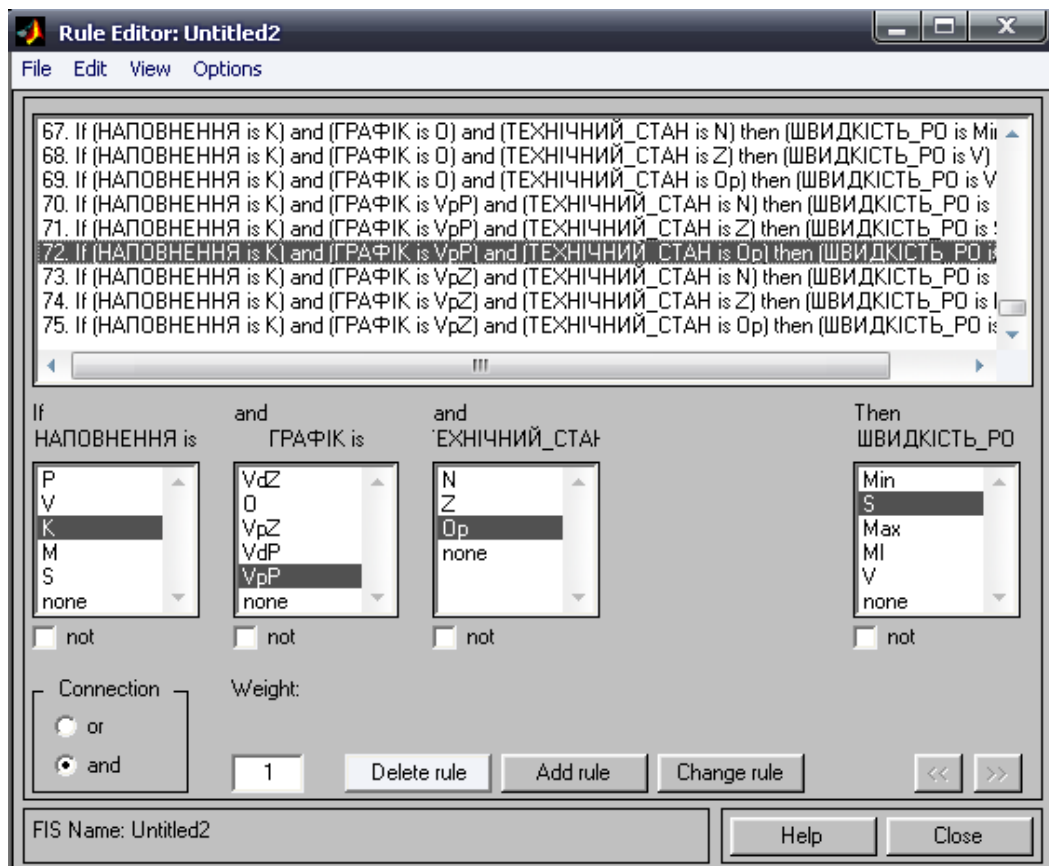


Рис. А.6. База правил нечіткої продукції для поточної моделі

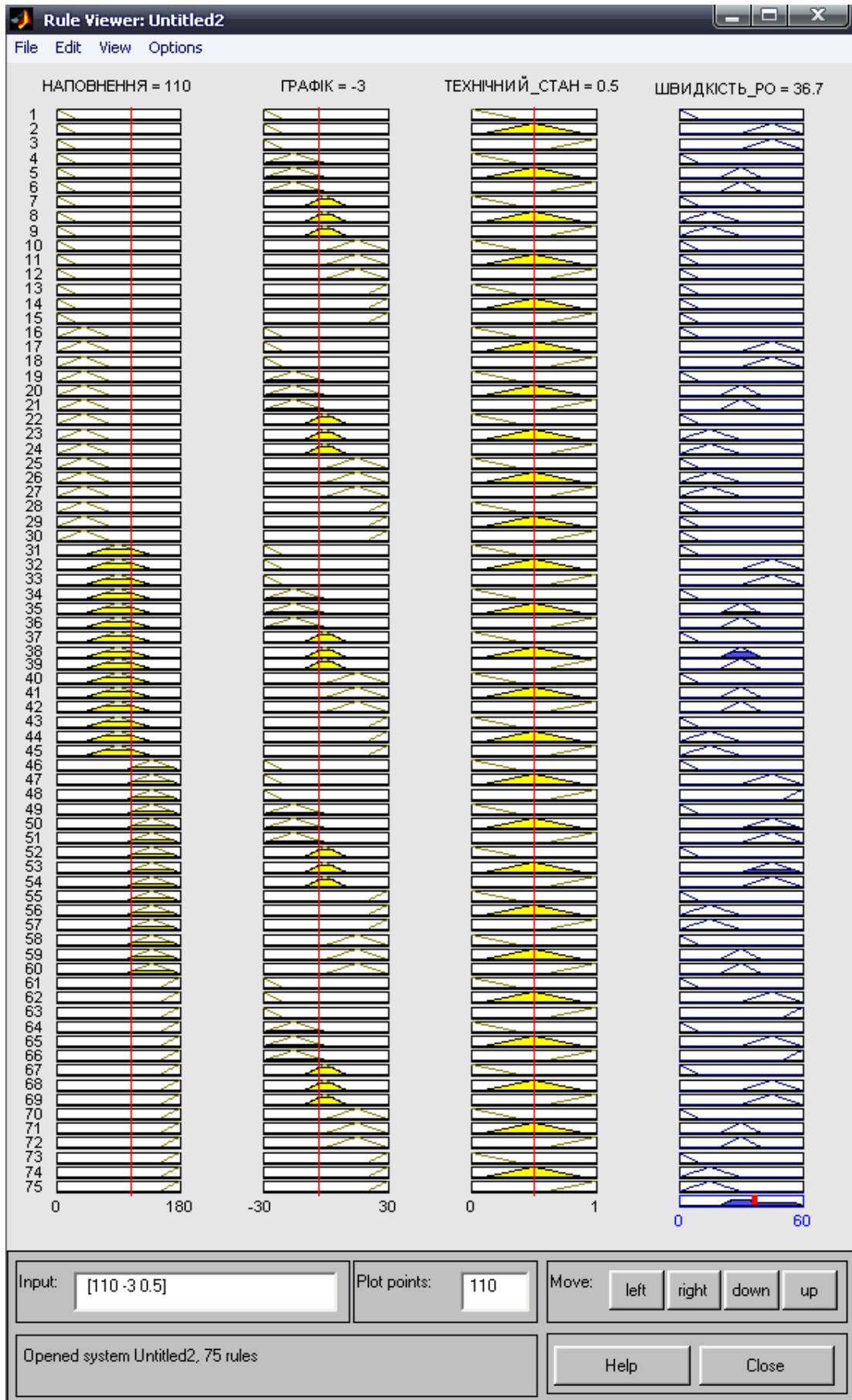


Рис. А.7. Результат нечіткого висновку для поточної моделі

Розглянемо ситуацію, коли значення вхідних змінних, припустимо, дорівнюють: наповнення рухомої 110 осіб, вона рухається з відставанням від графіку на 3 хвилини, її технічний стан задовільний. Управлінське рішення стосовно швидкості рухомої одиниці в побудованій моделі буде прийнято так, як показано на рис. А.7. В усіх задіяних термах вхідних змінних будуть зафарбовані деякі фігури з відповідними степенями приналежності. Терми вихідної змінної будуть зафарбовуватись в тому випадку, коли в деякому правилі виявляться присутніми задіяні терми, розглянуті у цьому правилі, для всіх трьох вхідних змінних. У ситуації, що розглядається, задіяними виявились правила 35, 38, 50, 53. Відповідно до алгоритму Мамдані та методу центра ваги (методу центроїду) значення вихідної змінної «ШВИДКІСТЬ РО» дорівнює 36.7 км/год.

Поточне значення швидкості керованої рухомої одиниці може дорівнювати заданому, але може й перевищувати чи бути меншим від нього. Управлінський вплив в таких ситуаціях буде різним. Позначимо через X_1 різницю між поточною та заданою швидкістю, а через X_2 – прискорення РО. Якщо трамвай рухається швидше, ніж треба, а значення прискорення близьке до нуля, то управлінським впливом Δn_1 безпосередньо на борту РО буде зменшення різниці X_1 за рахунок збільшення прискорення X_2 у від'ємний бік (управлінський вплив Δn_2). Якщо ж в тій самій ситуації прискорення буде не нульовим, а достатньо від'ємним, то додаткових управлінських втручань в поточний момент часу робити не треба.

Результати цього додатку отримані на основі узагальненої мережі Петрі з новими функціональними переходами (рис.3.17). Вони ілюструють вибір керуючого впливу на борту РО при корегуванні швидкості руху за формулою (3.28).

Додаток Б
Розробка моделі ситуаційної системи керування гальмівною
позицією на спускній частині гірки за допомогою інтегрованої середи
MatLab 6.5

При проектуванні інтелектуальних систем управління усе більш широке практичне застосування знаходять методи ситуаційного керування.

Сутність ситуаційного керування полягає в наступному. При синтезі системи вирішується завдання класифікації – розбивки множини можливих ситуацій на класи-еталони й зіставлення кожного еталону керуючого рішення. На етапі керування в реальному часі вирішується завдання ідентифікації – модель поточної ситуації зіставляється з еталонами й приймається керування, приписане тому еталону, що зіставимо з поточною ситуацією. Головним завданням розробки ситуаційного керування є вибір моделі подання ситуації. Модель визначає апарат теорії аналізу й синтезу ситуаційних систем керування. Універсальним апаратом подання моделі ситуацій (поточний і еталонний) є нечіткі множини.

Головною перевагою представлення моделі ситуацій нечіткими множинами є можливість у рамках єдиного апарата описувати складні гібридні системи, модель ситуації яких відбиває як дискретні, так і безперервні за значенням параметри; чітко виміряні й нечітко сформовані факти, а також різні динамічні властивості об'єкта.

Постановка задачі

До основних завдань, що повинна виконувати система регулювання швидкістю скочування: забезпечення необхідної дальності пробігу відчепів при безпечній швидкості зіткнення їх з вагонами, що знаходяться на підгіркових коліях (прицільне регулювання); створення необхідного

інтервалу між відчепами, що скочуються на спускній частині гірки (інтервальне регулювання).

Для вирішення задачі управління швидкістю відчепів на сортувальних гірках використовуються три гальмівні позиції (Рис. Б.1) :

I ГП (верхня) – розташована на швидкісному уклоні у головній частині гірки, до першої розділової стрілки; на цій ГП відбувається інтервальне регулювання.

II ГП (пучкова) – розташована на швидкісному уклоні перед розділовою стрілкою кожного пучка колій; тут відбувається інтервальне і прицільне гальмування.

III ГП (паркова) – на початку кожної сортувальної колії для прицільного гальмування.

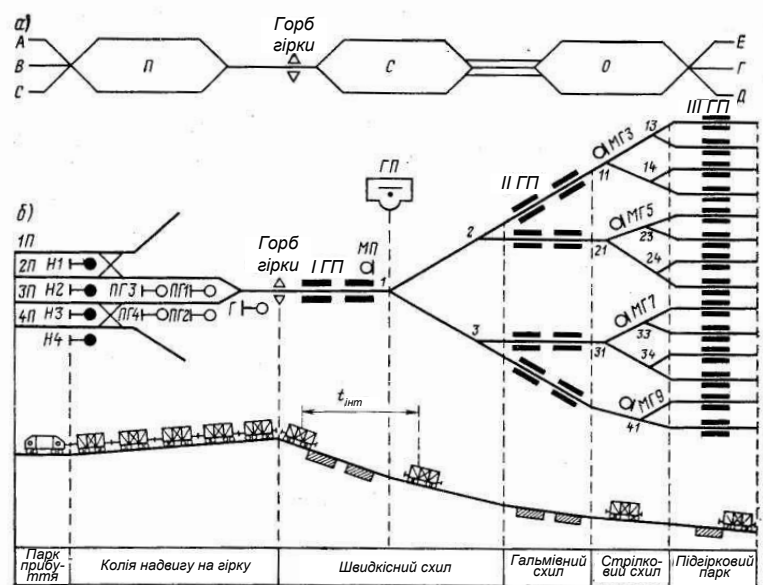


Рис. Б.1. Структурна схема розташування гальмівних позицій на гірці

Поставимо задачу розробки ситуаційної системи управління першою гальмівною позицією (I ГП), що забезпечує інтервальне регулювання швидкості скочування відчепів на спускній частині гірки.

До величин, що впливають на процес керування скочуванням відчепів на першій гальмівній позиції відносяться: вагова категорія відчепа, швидкість руху і відстань до наступного та попереднього відчепів.

Розробка нечіткої моделі

Основною стадією в розробці ситуаційної системи регулювання швидкості скочування відчепів є створення нечіткої моделі з використанням основних етапів нечіткого висновку.

Перейдемо безпосередньо до розробки ситуаційної системи керування І ГП на спускній частині гірки. До вхідних параметрів системи нечіткого висновку належать наступні лінгвістичні змінні:

– „*ВАГА*” – вагова категорія відчепа, позначимо її як β_1 , термножиною β_1 є спрощена множина $T_1 = \{\text{Легка, Середня, Важка}\}$, або в скороченому варіанті $T_1 = \{\text{Л, С, В}\}$;

– „*ШВИДКІСТЬ*” – швидкість руху відчепа – β_2 , з термножиною $T_2 = \{\text{Не рухається, Мала, Середня, Велика}\}$, або у скороченому вигляді $T_2 = \{\text{НР, М, С, В}\}$;

– „*ВІДСТАНЬ*” – відстань до попереднього відчепа – β_3 , значення якої визначаються множиною $T_3 = \{\text{Мала, Середня, Велика}\}$, або у скороченому вигляді $T_3 = \{\text{М, С, В}\}$. Слід зазначити, що якщо попереду відчепа нема інших відчепів, то „*ВІДСТАНЬ*” приймається великою;

До вихідних параметрів системи нечіткого висновку відноситься єдина лінгвістична змінна – „*СТУПІНЬ ГАЛЬМУВАННЯ*” – ступінь гальмування уповільнювача, позначимо її як ω_1 . Змінна ω_1 визначається наступною термножиною: $T = \{\text{Не гальмувати, I ступінь, II ступінь, III ступінь, IV ступінь}\}$, або у скороченому вигляді $T = \{\text{НГ, I ст, II ст, III ст, IV ст}\}$.

Слід зазначити, що ситуаційна система буде створена із застосуванням алгоритму нечіткого висновку Мамдані.

База правил, на основі якої відбувається керування І ГП, буде мати вигляд:

ПРАВИЛО_1: ЯКЩО „ $\beta_2 \rightarrow HP$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow HG$ ”

ПРАВИЛО_2: ЯКЩО „ $\beta_2 \rightarrow M$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow HG$ ”

ПРАВИЛО_3: ЯКЩО „ $\beta_3 \rightarrow B$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow HG$ ”

ПРАВИЛО_4: ЯКЩО „ $\beta_1 \rightarrow L$ ” І „ $\beta_2 \rightarrow C$ ” І „ $\beta_3 \rightarrow M$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow I \text{ cm}$ ”

ПРАВИЛО_5: ЯКЩО „ $\beta_1 \rightarrow L$ ” І „ $\beta_2 \rightarrow C$ ” І „ $\beta_3 \rightarrow C$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow HG$ ”

ПРАВИЛО_6: ЯКЩО „ $\beta_1 \rightarrow L$ ” І „ $\beta_2 \rightarrow B$ ” І „ $\beta_3 \rightarrow M$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow II \text{ cm}$ ”

ПРАВИЛО_7: ЯКЩО „ $\beta_1 \rightarrow L$ ” І „ $\beta_2 \rightarrow B$ ” І „ $\beta_3 \rightarrow C$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow I \text{ cm}$ ”

ПРАВИЛО_8: ЯКЩО „ $\beta_1 \rightarrow C$ ” І „ $\beta_2 \rightarrow C$ ” І „ $\beta_3 \rightarrow M$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow II \text{ cm}$ ”

ПРАВИЛО_9: ЯКЩО „ $\beta_1 \rightarrow C$ ” І „ $\beta_2 \rightarrow C$ ” І „ $\beta_3 \rightarrow C$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow I \text{ cm}$ ”

ПРАВИЛО_10: ЯКЩО „ $\beta_1 \rightarrow C$ ” І „ $\beta_2 \rightarrow B$ ” І „ $\beta_3 \rightarrow M$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow III \text{ cm}$ ”

ПРАВИЛО_11: ЯКЩО „ $\beta_1 \rightarrow C$ ” І „ $\beta_2 \rightarrow B$ ” І „ $\beta_3 \rightarrow C$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow II \text{ cm}$ ”

ПРАВИЛО_12: ЯКЩО „ $\beta_1 \rightarrow B$ ” І „ $\beta_2 \rightarrow C$ ” І „ $\beta_3 \rightarrow M$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow III \text{ cm}$ ”

ПРАВИЛО_13: ЯКЩО „ $\beta_1 \rightarrow B$ ” І „ $\beta_2 \rightarrow C$ ” І „ $\beta_3 \rightarrow C$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow II \text{ cm}$ ”

ПРАВИЛО_14: ЯКЩО „ $\beta_1 \rightarrow B$ ” І „ $\beta_2 \rightarrow B$ ” І „ $\beta_3 \rightarrow M$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow IV \text{ cm}$ ”

ПРАВИЛО_15: ЯКЩО „ $\beta_1 \rightarrow B$ ” І „ $\beta_2 \rightarrow B$ ” І „ $\beta_3 \rightarrow C$ ”, ТО „ $\omega_1 \rightarrow III \text{ cm}$ ”

Після розробки бази правил можемо перейти безпосередньо до нечіткого моделювання процесу регулювання швидкістю. Розробку будемо проводити за допомогою інтегрованої середовища розробок MatLab 6.5 та пакету Fuzzy Logic ToolBox призначеного для реалізації процесу нечіткого моделювання.

На першому етапі синтезуємо нечітку модель системи курування І ГП, на основі розробленої бази правил.

Процес розробки системи нечіткого висновку в інтерактивному режимі для моделі регулювання швидкості відчепа на І ГП складається у виконанні наступної послідовності дій:

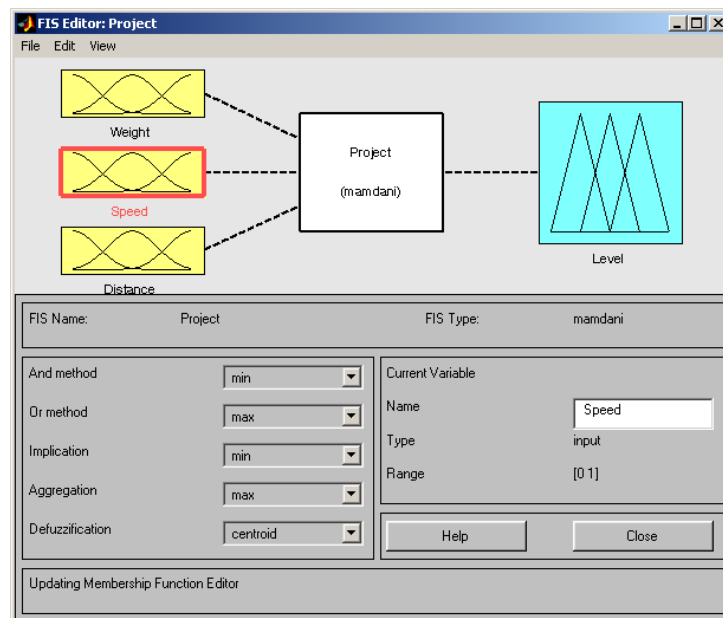


Рис. Б.2. Вигляд редактора FIS

Викликаємо редактор систем нечіткого висновку FIS, для чого у вікні команд набрати ім'я відповідної функції fuzzy. (Рис. Б.2). Оскільки на вхід системи для управління І ГП подається три параметри, то необхідно додати в розроблювальну систему FIS ще дві вхідних змінних.

Змінимо імена вхідною змінною, запропонованою системою MATLAB за замовчуванням. Результат додавання і зміни імен змінних системи нечіткого висновку зображений на рис. Б.2.

На вихід системи нечіткого висновку подається одна змінна – „СТУПІНЬ ГАЛЬМУВАННЯ”, тому нема необхідності змінювати кількість вихідних параметрів, змінимо тільки назву.

Із-за некоректного відображення символів кирилиці лінгвістичні змінні будемо називати словами англійської мови, так „ВАГА” описується

як „*Weight*”, „*ШВИДКІСТЬ*” – „*Speed*”, „*ВІДСТАНЬ*” – „*Distance*”, „*СТУПІНЬ ГАЛЬМУВАННЯ*” – „*Level*” (Рис. Б.2.).

Тепер необхідно визначити терми і їхні функції приналежності для вхідної й вихідної змінних системи нечіткого висновку. Для цієї мети варто скористатися редактором функцій приналежності, що може бути викликаний в наступний спосіб: Edit > Membership Functions...

Після виклику редактора функцій приналежності кожної зі змінних за замовчуванням пропонується 3 терми із трикутними функції приналежності.

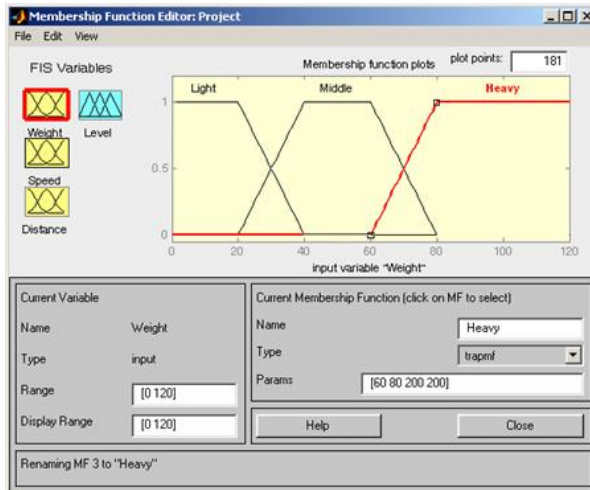
Далі змінимо назви термів першої вхідній змінної „*Weight*”, запропоновані системою MATLAB за замовчуванням на „*Light*”, „*Middle*”, „*Heavy*” відповідно кирилицею „*Легка*”, „*Середня*”, „*Важка*”. Після чого змінимо тип функцій приналежності першої змінної, запропонований за замовчуванням, на функції типу трапеція – „trapezmf”, вибравши відповідний пункт у поле Type. В поля Range і Display Range заносимо діапазон значень вхідної змінної „*Weight*” він дорівнює [0 120]. Для функцій приналежності кожного терму замінимо параметри (поле Params) наступним чином: для терму „*Light*” задамо параметри [0 0 20 40], для терму „*Middle*” – [20 40 60 80] і для терму „*Heavy*” – [60 80 200 200]. Слід зазначити, що вхідна величина „*ВАГА*” дорівнює натиску колеса відчепа на рейку і вимірюється у кН.

Вид редактора функцій приналежності після внесених змін для змінної „*ВАГА*” зображений на рис. Б.3, а.

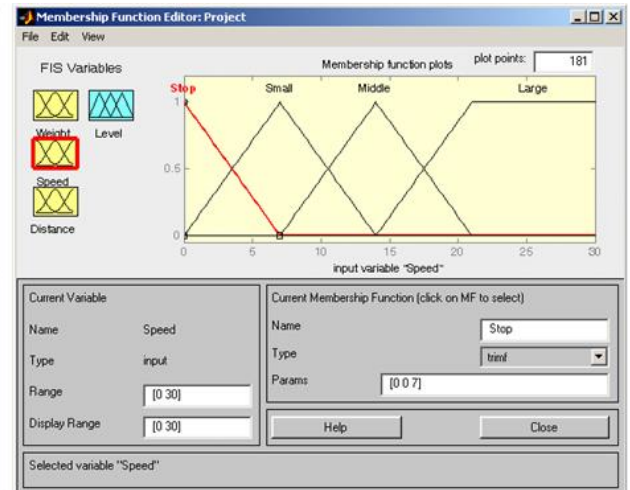
Для другої вхідної лінгвістичної змінної „*Speed*” („*ШВИДКІСТЬ*”) змінимо запропоновану системою кількість термів три на чотири за допомогою команди Edit>Add Custom MF. Змінимо назви термів другий вхідній змінної „*Speed*” на „*Stop*”, „*Small*”, „*Middle*”, „*Large*” відповідно, або українською „*Не рухається*”, „*Мала*”, „*Середня*”, „*Велика*”. Значення інших полів наступні:

- Range і Display Range: [0 30];

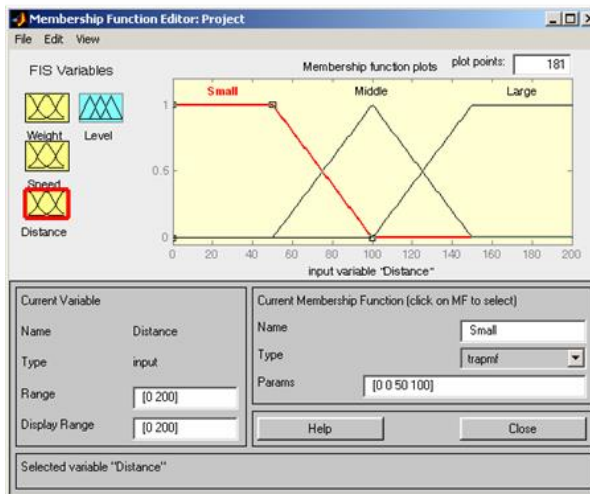
- поле Type для терму “Large”: trapmf;
- поле Type для інших термів: trimf;
- параметри термів (поле Params): “Stop” – [0 0 7], “Small” – [0 7 14], “Middle” – [7 14 21], “Large” – [14 21 30 30].



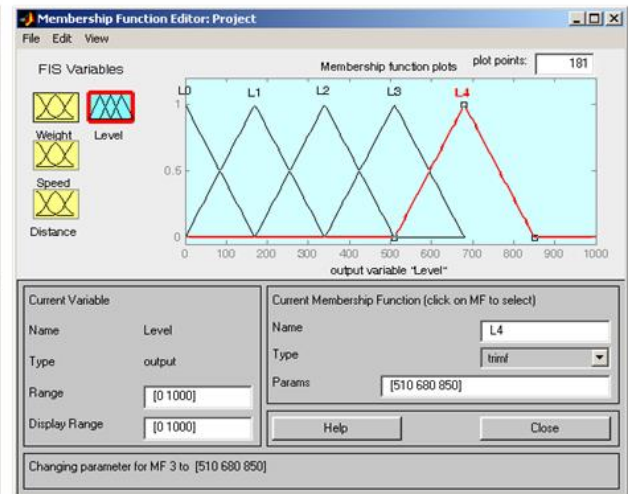
a)



б)



в)



г)

Рис. Б.3. Функції приналежності термів нечітких змінних „ВАГА”(а), „ШВИДКІСТЬ”(б), „ВІДСТАНЬ”(в), „СТУПІНЬ ГАЛЬМУВАННЯ”(г)

Слід зазначити, що вхідна фізична величина „ШВИДКІСТЬ” вимірюється у км/год.

Вид редактора функцій приналежності після внесених змін для другої вхідної змінної зображений на рис. Б.3, б.

Змінимо назви термів третьої вхідний змінної „*Distance*” („*ВІДСТАНЬ*”) на “*Small*”, “*Middle*”, “*Large*” відповідно, або українською „*Мала*”, „*Середня*”, „*Велика*”. Значення інших полів наступні:

- Range і Display Range: [0 200];
- поле Type для термів “*Small*” та “*Large*” : trapmf;
- поле Type для терму “*Middle*”: trimf;
- параметри термів (поле Params): “*Small*” – [0 0 50 100], , “*Middle*” – [50 100 150], “*Large*” – [100 150 1000 1000];

Слід зазначити, що вхідна величина „*ВІДСТАНЬ*” вимірюється у метрах.

Вид редактора функцій приналежності для вхідної змінної „*Distance*” зображений на рис. Б.3, в.

Після обробки вхідних змінних перейдемо до завдання функцій приналежності термів вихідної змінної „*СТУПІНЬ ГЛЬМУВАННЯ*” (“*Level*”).

Для вихідної лінгвістичної змінної „*Level*” змінимо запропоновану системою кількість термів три на п'ять за допомогою команди Edit>Add Custom MF...

Змінимо назви термів третьої вихідний змінної „*Level*” на “*L0*”, “*L1*”, “*L2*”, “*L3*”, “*L4*” відповідно, або в символах кирилиці „*Не гальмувати*”, „*I ступінь*”, „*II ступінь*”, „*III ступінь*”, „*IV ступінь*”. Для змінної всіх термів змінної „*Level*” тип функції приналежності залишимо незмінним – trimf (трикутна). В поля Range і Display Range заносимо діапазон значень вхідної змінної „*Level*” він дорівнює [0 1000]. Змінимо параметри термів вихідної змінної на наступні значення: “*L0*” – [0 0 170], “*L1*” – [0 170 340], “*L2*” – [170 340 510], “*L3*” – [340 510 680], “*L4*” – [510 680 850]. Слід зазначити, що вхідна величина „*СТУПІНЬ ГЛЬМУВАННЯ*”

дорівнює тиску у гальмівному циліндрі уповільнювача і вимірюється у кПа.

Вид редактора функцій приналежності для вхідної змінної „*Level*” зображений на рис. Б.3, з.

Перейдемо тепер до визначення правила нечіткого висновку для розроблювальної експертної системи. Для цієї мети варто скористатися редактором правил, що може бути викликаний у наступний спосіб: командою меню Edit>Rules...

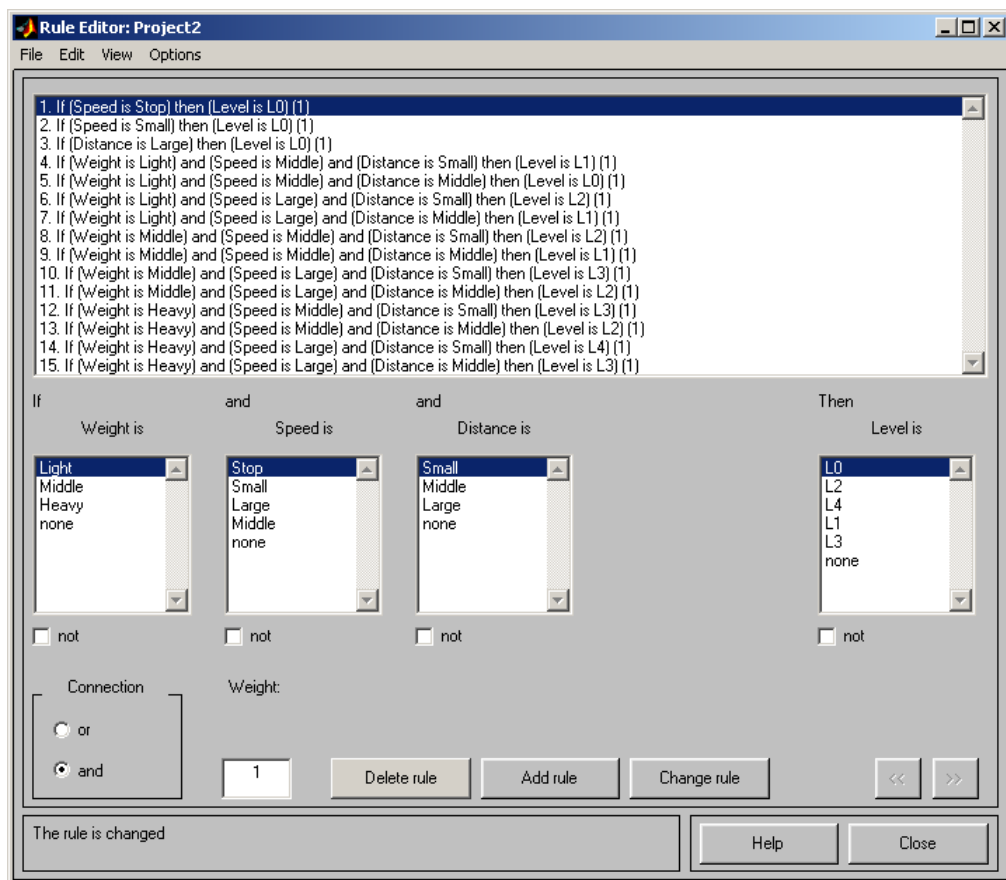


Рис.Б.4. Редактор бази правил нечітких продукцій

Оскільки спочатку база правил нечіткого висновку порожня, то після виклику редактора правил центральне багатострокове поле уведення не містить ніяких правил. Для їхнього визначення варто використати поля меню й перемикачі в нижній частині графічного інтерфейсу редактори правил. Для завдання першого правила варто залишити виділене за

замовчуванням поле з ім'ям терму “*Light*” для першої вхідний змінної, поле з ім'ям “*Middle*” для другий вхідний змінної, поле з ім'ям терму “*Small*” для третьої вхідної змінної а також поле з ім'ям терму „L1” для вихідної змінної. Далі треба перемикач Connection поставити в положення AND (логічне І) і нажати на кнопку Add rule. Після цього перше правило із символами кирилиці відобразиться у верхнім вікні.

Аналогічним чином вводимо усі правила з бази правил нечітких продукцій для І ГП.

Вид редактора правил після їхнього визначення для розроблювальної ситуаційної системи зображений на рис. Б.4.

Після завдання правил нечіткого висновку виявляється можливим одержати результат нечіткого висновку (значення вихідний змінної) для конкретних значень вхідних змінних. Із цією метою необхідно відкрити програму перегляду правил одним наступним способом: меню View> Rules

Після виклику програми перегляду правил для системи нечіткого висновку за замовчуванням для вхідних змінних запропоновані середні значення з інтервалу їхніх припустимих значень. На рис. Б.5. приведено результати нечіткого висновку для ситуації при якій на І ГП входить відчеп колеса на рейку якого становить 60 кН, швидкість відчепа 15 км/год, відстанню до попереднього відчепа 100 м. При такій ситуації результатом нечіткого висновку буде значення тиску у гальмівному балоні уповільнювача на першій гальмівній позиції буде дорівнювати 201 кПа.

В аналогічний спосіб можна підрахувати значення тиску у гальмівному балоні для будь-якого значення вхідних параметрів.

Головною перевагою представлення моделі ситуацій нечіткими множинами є можливість у рамках єдиного апарата описувати складні гібридні системи, модель ситуації яких відбиває як дискретні, так і безперервні за значенням параметри; чітко виміряні й нечітко сформовані факти, а також різні динамічні властивості об'єкта.

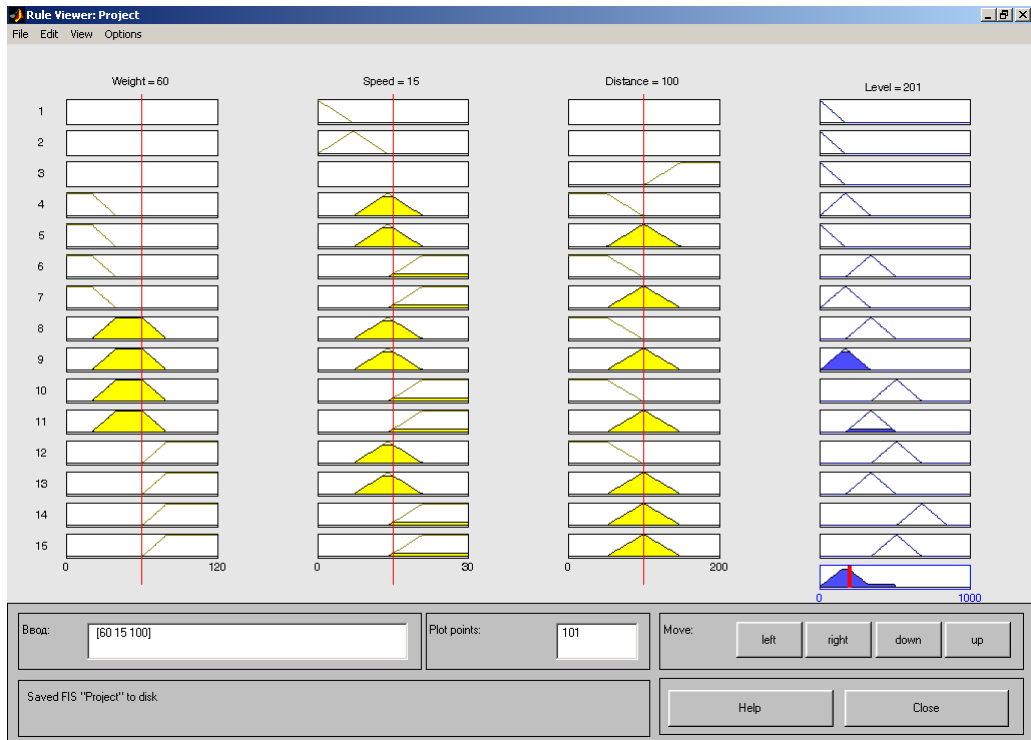


Рис. Б.5. Результати нечіткого висновку для середніх значень вхідних змінних

Найбільш ефективний цей спосіб виявляється для складних нечітких моделей з більшим числом змінних і правил нечіткого уведення. У цьому випадку завдання змінних і функцій приналежності їх термів у графічному режимі, а також візуалізація правил дозволяють істотно зменшити трудомісткість розробки нечіткої моделі, знизити кількість можливих помилок і скоротити загальний час нечіткого моделювання.

Результати нечіткого моделювання можна застосовувати при створенні нечітких контролерів для керування ситуаційної системи управління скочуванням відчепу на гірці.

Додаток В

Приклад програмної організації ситуаційних систем

Ралізація системи ситуаційного управління, розробленої за розглянутій технологією, здійснена з використанням інструментального комплексу. Інструментальний комплекс підтримує наступні моделі: чисельні, об'єктний, декларативний і продукційний опис.

Кожна задача управління представляється у вигляді наочної (предметної) області, яка описує структуру об'єкту і алгоритм управління. Окремі частини наочної області, які розглядаються як «самостійні підсистеми», представлені у вигляді секцій даних і знань.

Структурною одиницею секції є об'єкти, які мають список «атрибутів», повністю що описують всі «поведінкові здібності» і характеристики окремо взятого «самостійного об'єкту».

Виділені наступні типи атрибутів: ціла, дійсна, нечітка множина, лінгвістична змінна, множина, рядок. Крім того, атрибути бувають обчислюваними і змінними. Обчислювані це ті, які посилаються на функцію, по якій обчислюється значення даного атрибута. Ця функція може обчислюватися на підставі значень інших атрибутів. Змінні це ті, значення яких змінюється безпосередньо зовнішнім оточенням об'єкту управління (датчиками), або «механізмом висновку. Ця характеристика атрибута, введена для додатків реального часу, названа статусом атрибута. Атрибут має наступні статуси:

статичний внутрішній – значення якого змінюється тільки механізмом висновку;

статичний зовнішній – значення змінюється механізмом висновку, проте це значення використовується як управляючий сигнал для оточення об'єкту управління;

динамічний внутрішній – значення використовується механізмом висновку, проте змінюється значення за допомогою іншого атрибута;

динамічний зовнішній – значення використовується механізмом висновку, але змінюється тільки оточенням об'єкту управління (датчик).

Вище приведені визначення ілюструються на рис. В.1.

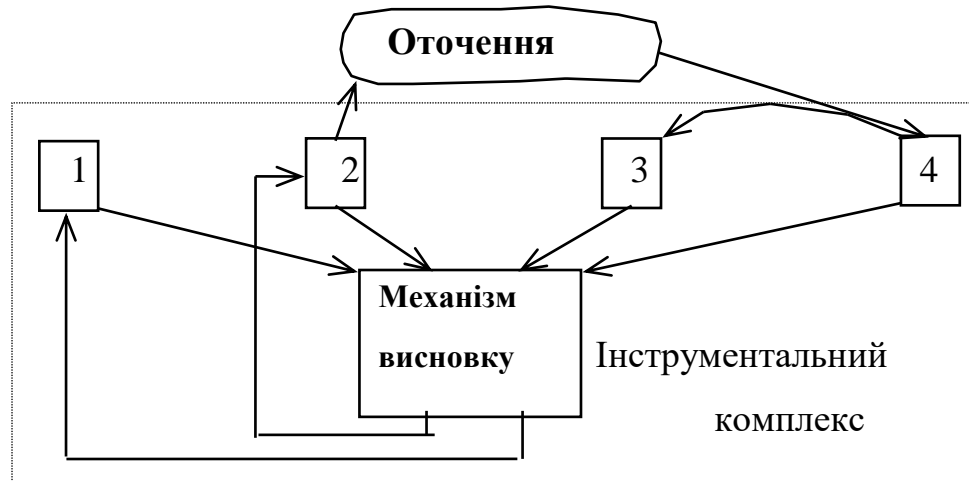


Рис.В.1. До пояснення статусу атрибута:

1- статичний внутрішній, 2 – статичний зовнішній, 3 – динамічний внутрішній, 4 – динамічний зовнішній

В комплексі використовується наступна структура даних для відносин різних рівнів зв'язків:

Таблиця В.1

Віднош	Елем_1	μ_1	Об'єкт_2	Атрибут_2	Елем_2	μ_2	
IF_00	zf_0	0,5	@	@	z_05		
		0,6	@	@	z_075		
		0,7	@	@	z_10		
		
	zf_1/4	0,5	@	@	z_05		
		0,8	@	@	z_075		

	zf_1/2
	
	zf_1
AND_01	z_05	1	ДАТ	РЦ	s1	1	
		1	ДАТ	РЦ	s2	0	
	z_075	1	ДАТ	РЦ	s1	1	
		1	ДАТ	РЦ	s2	1	
		1	ДАТ	РЦ	s3	0	
...		

Стовпець «Віднош» показує яким відношенням і на якому рівні зв'язані елементи. IF_00 – означає відношення IF на 00 рівні, AND_01 – відношення \forall на 01 рівні, відповідно OR_02 – відношення \exists на 02 рівні (в даному прикладі не використовувалося). Стовпець «Елем_1» показує всі елементи даного рівня (zf_0, zf_1/4 ..., zf_1). Стовпець « μ_1 » – функції обладнань цих елементів (обчислюються по матриці відносин). Стовпці «Об'єкт_2», «Атрибут_2» – описують повну приналежність «Елем_2» до фізичних об'єктів. Стовпець «Елем_2» – показує які елементи «нижнього рівня» беруть участь в обчисленні значень елементів «Елем_1», стовпець

« μ_2 » – функція приналежності еталонних значень «Елем_2» (береться з таблиці еталонів).

Таким чином, з табл В.1 ми бачимо, що в обчисленні значень елемента zf_0 беруть участь всі елементи з множини Z (для $zf_1/4 \dots, zf_1$ так само беруть участь всі елементи множини Z).

Знак «@» – в стовпцях «Об'єкт_2», «Атрибут_2» – означає, що елементи множини Z не пов'язані ні з якими фізичними об'єктами і є проміжними на стадії обчислення елементів множини ZF через множину S . Вони є тимчасовими «внутрішніми елементами», тобто «динамічні внутрішні».

На рис.В.2 наведено інтерфейс головного вікна комплексу. Випадаючий список «Вибір моделі» надає вже наявні моделі, введені в систему. Користувач може вибрати із списку будь-яку модель і запустити її на виконання.

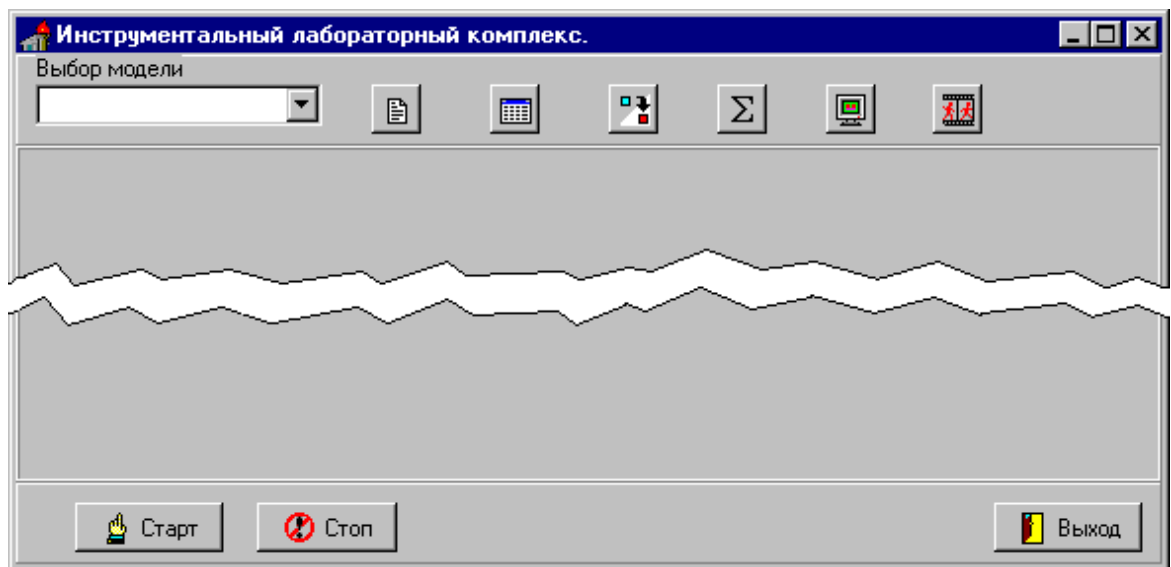


Рис. В.2. Интерфейс головного вікна

На верхній панелі вікна є ряд допоміжних кнопок:



– кнопка для об'єктного опису;



– кнопка для декларативного опису;



– кнопка для продукційного опису;



– кнопка для опису процедур;









– кнопка для опису «монітора»;



– кнопка покрокового тестування.

Кожна з цих кнопок дає можливість користувачу створити певну частину майбутньої моделі системи управління. Технологія створення нової моделі наступна:

1. Ввести новий об'єктний опис майбутньої моделі (кнопка );
2. Ввести декларативний опис для динамічних внутрішніх атрибутів (кнопка );
3. Ввести продукційний опис — набір продукційних правил, що описують механізм виведення (кнопка );
4. Створити нові процедури для зв'язку атрибутів, декларативних та продукційних правил (кнопка );
5. Задати послідовність процедур для «монітора», щоб створити динамічну у часі модель (кнопка );
6. Протестувати створену модель за допомогою покрокового виконання (кнопка )

На рис.В.3 приведена форма покрокового тестування, яка дає можливість проглянути всі результати обчислень значень атрибутів на прикладі атрибута НАПОВНЕННЯ РО.

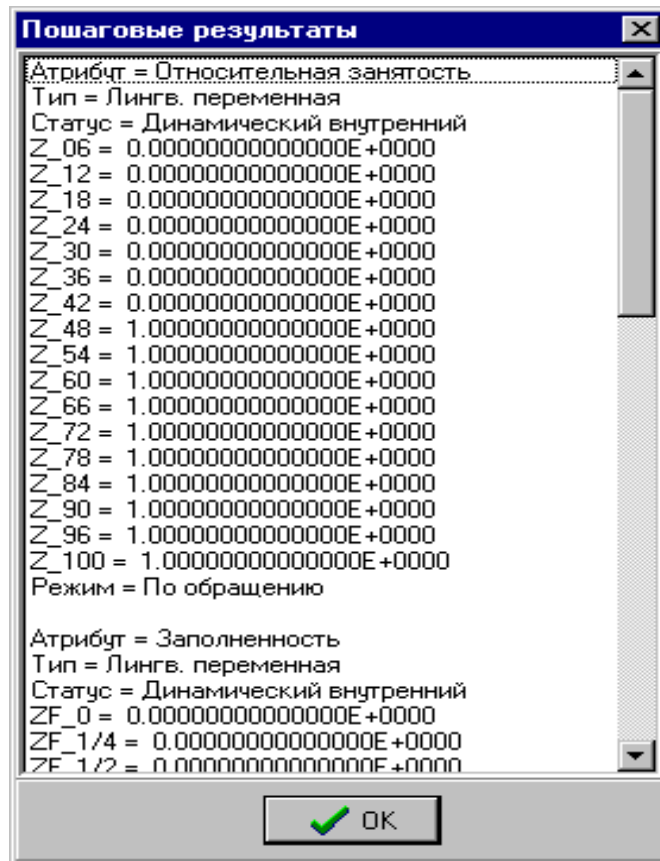


Рис. В.3. Форма покрокового тестування

Даний модуль реалізує наступний алгоритм: спочатку є видимим статус атрибута і перевіряється на рівність його «Динамічний внутрішній», якщо ні, то узяття його значень з об'єктного опису і перевіряється чи є він глобальним атрибутом (для якого і обчислюється дане правило), якщо так, то вихід, якщо ні, то перехід на щонайвищу таблицю і підрахунок процедури відносин (AND, OR, IF), після цього перевіряється чи не досягли щонайвищого рівня, якщо ні, то перехід на рівень вище і знову підрахунок процедури відносин, якщо досягли щонайвищого рівня, то запис в базу Об'єктного Опису значень і перевірка чи є поточний атрибут глобальним (для якого і обчислюється дане правило), якщо так, то вихід, якщо ні, то цикл новий. Якщо статус рівний «Динамічний внутрішній», то запит в Базу Декларативних Знань (БДЗ), відкриття таблиці для цього атрибута, спуск на низчий рівень і знов перевірка статусу на рівність його «Динамічний внутрішній». Структура цих баз приведена на рис.В.4.

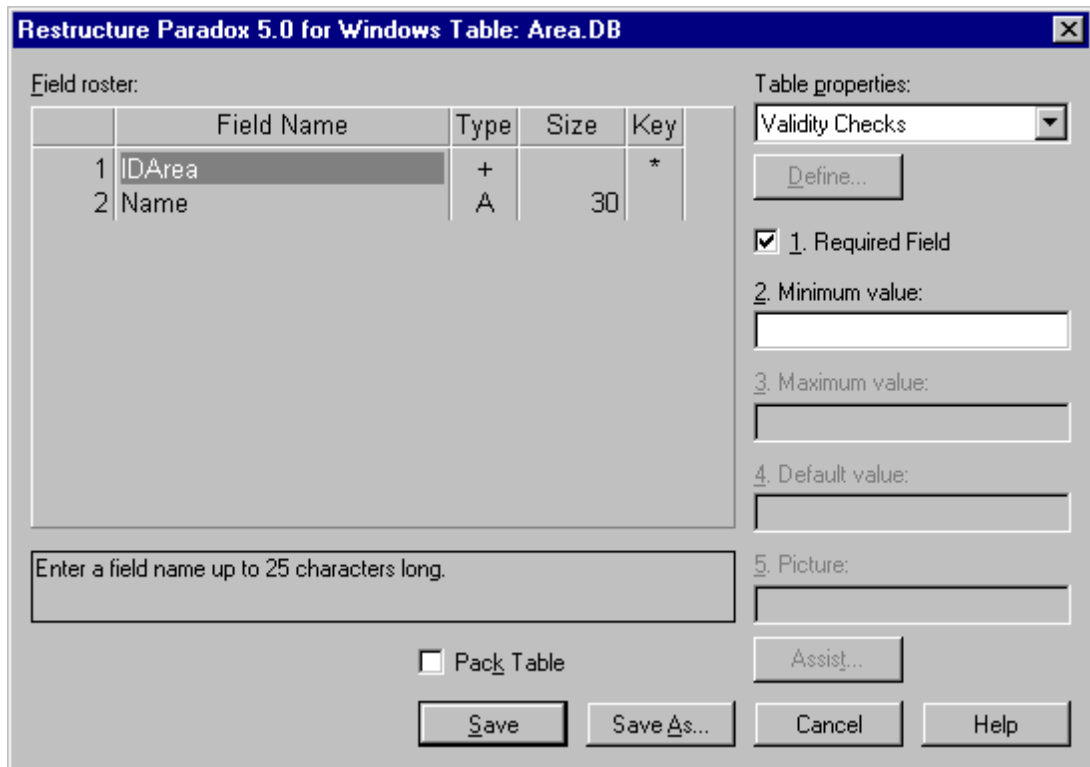


Рис. В.4. Структура бази даних областей

База об'єктів пов'язана з базою областей таким чином: поле IDArea бази областей пов'язано з відповідним полем з бази об'єктів і перемикач Update rule стоїть в тому ж положенні що і на рис.В.5. Отже значення поля IDArea бази областей автоматично підставлятиметься у відповідне поле в базі об'єктів.

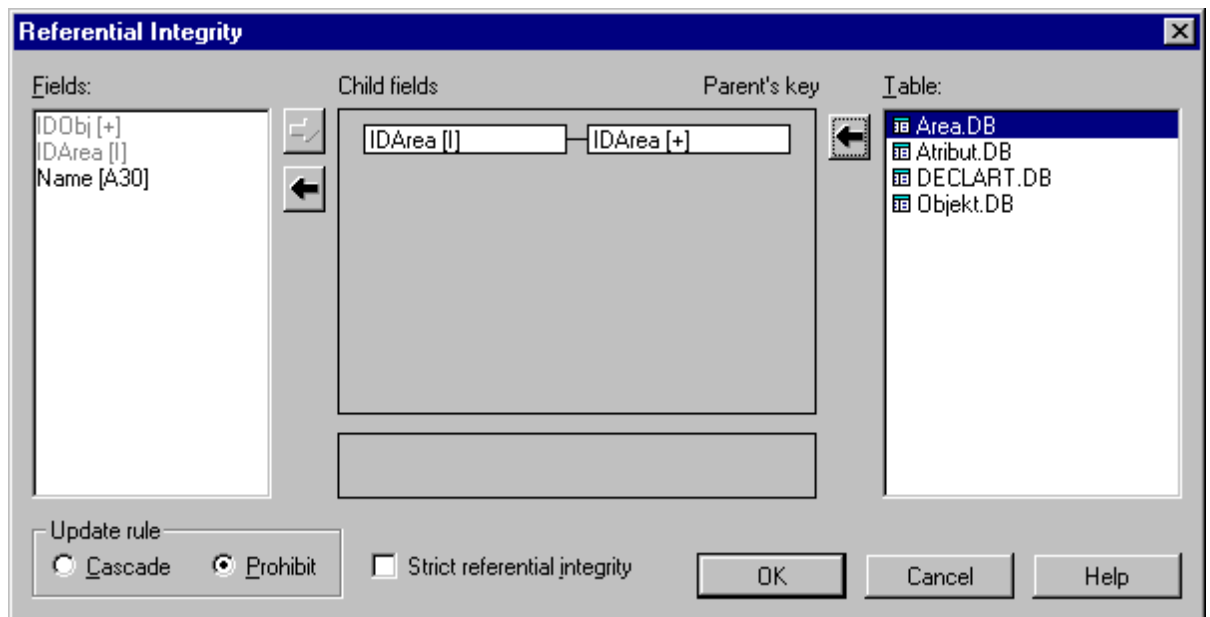


Рис. В.5. Зв'язок полів бази областей з полями бази об'єктів

Завдяки цим рішенням відношення «багато хто до одного» між даними, на яких побудовані всі декларативні права, приведені в другому розділі, мають наочність, тобто який атрибут відноситься до якого об'єкту і до якої області.

Структура бази даних декларативних знань дана на рис. В.6. Тут No – номер запису, IDArea, IDObj, IDAtr, – значення полів, по яких єдиним чином можна поставити у відповідність таблицю декларативного опису для даного атрибута, Otnosh – відношення, яким зв'язані елементи, Elem_1 – ім'я елемента, для якого потрібно порахувати значення, M_1 – функція приналежності для Elem_1 (береться з матриці відносин), Objekt_2, Atribut_2, Elem_2 – значення, на основі яких обчислюється значення M_1 для Elem_1, M_2 – еталонне значення функції приналежності для Elem_2 (береться з таблиці еталонів). Ця база не зв'язана ні якими відносинами з рештою баз.

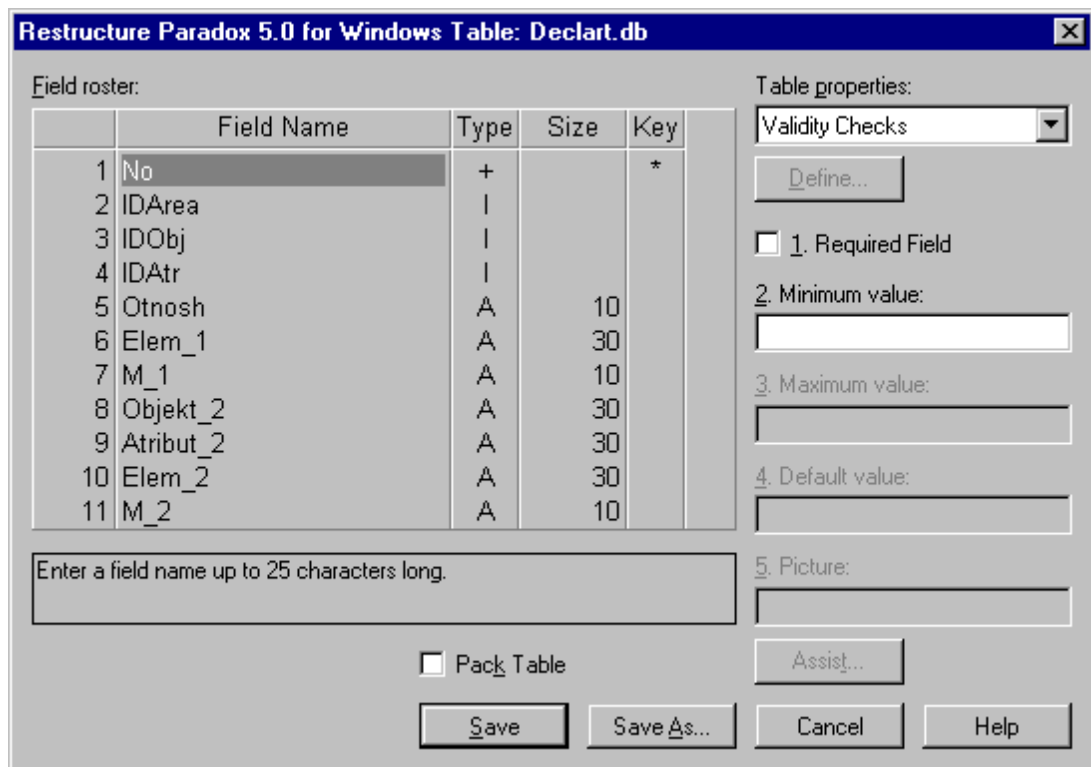


Рис. В.6. Структура бази даних декларативних знань

Інтерфейс об'єктного опису наведений на рис. В.7. Дана форма роз'їдена на три поля: Области, Об'єкти і Атрибути. В кожному з полів відбувається перегляд і редагування відповідної бази даних. За Областями закріплена база даних Area.db, за об'єктами – Objekt.db, за атрибутами – Atribut.db. Всі бази реалізовані у форматі PARADOX 7, а мова баз – PARADOX «Сурт» 866.

В цій формі вводяться ім'я атрибута, елементи і їх значення (в один рядок через «;»). Вибирається тип і статус атрибута. Причому, кнопка «Декларативний опис» і Режим доступні тільки в тому випадку, якщо Статус атрибута рівний «Динамічний внутрішній», а значення вводяться тільки в тому випадку, якщо Тип атрибута або «нечітка множина», або «лінгвістична змінна». Ім'я об'єкту і ім'я області підставляється автоматично.

Name	Type	Status	Element
Заполненность	Лингв. переменная	Динамический внутренний	ZF_0;ZF_1/4
Относительная занятость	Лингв. переменная	Динамический внутренний	Z_06;Z_12;Z
Датчики	Нечеткое множество	Динамический внешний	S1;S2;S3;S4

Рис. В.7. Форма об'єктного опису

Таким чином, за допомогою такого інтерфейсу реалізується повний об'єктний опис, про який розказувалося в другому розділі даної роботи.

Продукційний опис є базою продукційних правил, які розбиті на секції. В продукційних правилах вигляду

ЯКЩО Умова1 ТО Умова2

Умова1 є списком умов, з'єднаних між собою операцією AND (и). Кожна з умов може мати вигляд:

Область1.Об'єкт1.Атрибут1 = Область2.Об'єкт2.Атрибут2

або

Область1.Об'єкт1.Атрибут1 = Значення

причому замість знака рівності може стояти будь-якою з умовних знаків (< <= > >= <>).

Умова2 може бути декількома можливостями:

Процедура– який потрібно застосувати замість існуючому;

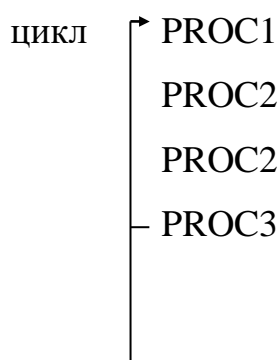
Одиночна умова типу Область1.Об'єкт1.Атрибут1 = Область2.Об'єкт2.Атрибут2 або Область1.Об'єкт1.Атрибут1 = Значення;

Умова1 (... AND ...).

Декілька правил об'єднуються в секції, і до однієї і тієї ж наочної області можуть відноситися декілька секцій правил.

При ініціалізації «монітора» на головному вікні меню комплексу приходить в дію модуль, реалізуючи введення і редагування даного монітора. Причому для однієї і тієї ж області можуть бути створено декілька моніторів.

Структура монітора представляє з себе циклічне повторення декількох процедур, що описують або обробку правил, або спеціальні обчислення. Наприклад:



тобто виконуються процедури PROC1, PROC2, PROC2 і PROC3. Після цього весь процес повторюється. Крім того, в структурі монітора можуть зустрічатися і складні розгалуження вигляду

ЯКЩО Умова1 ТОДІ PROC1 ІНАКШЕ PROC2

Нижче наведено структуру монітора, що реалізовує ситуаційний підхід до диспетчерського управління рухом трамвайного транспорту р. Харкова.

М1: ЯКЩО секція МАРШРУТ_1 об'єкт ПЕ_ОБОБ

атрибут датчик_контрольної_крапки = 1

ТОДІ секція МАРШРУТ_11 процедура AND_OR_IF

секція СЕКЦИЯ_0 процедура PROD;

ІНАКШЕ GO TO M2;

ЯКЩО секція БПЗ_1 процедура PROD

ТОДІ М11: секція БПЗ_1 процедура AND_OR_IF

секція ДДМ процедура ДДМ

секція БПЗ_2 процедура PROD

ЯКЩО секція БПЗ_3 процедура PROD

ТОДІ GO TO M11;

ІНАКШЕ секція БПЗ_3 процедура AND_OR_IF;

;

GO TO M1;

М2: ЯКЩО секція МАРШРУТ_2 об'єкт РО_ОБОБ

атрибут датчик_контрольної_точки = 1

ТОДІ секція МАРШРУТ_21 процедура AND_OR_IF

секція СЕКЦИЯ_0 процедура PROD;

ІНАКШЕ GO TO M3;

.

Перша умова перевіряє наявність зміни значення хоча би одного атрибута (зовнішнього динамічного, відбувається під час вступу сигналу від датчика контрольної крапки). За наявності сигналу здійснюється обробка цієї зміни - формування за декларативними правилами моделі реальної ситуації (секція МАРШРУТ_1) формування локального диспетчерського керування (секція СЕКЦИЯ_0) перевірка ситуації на наявність «пробок» (секція БПЗ_1), а при виконанні умов відпрацьовується технологія формування глобальних диспетчерських керувань за дискретною динамічною моделлю (секції БПЗ_1, БПЗ_2, БПЗ_, ДДМ). Аналогічно описана обробка решти тридцяти маршрутів.

Додаток Г
Акти впровадження

МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ	
Українська державна академія залізничного транспорту	
№ 01116472	
61050, Україна, м. Харків майдан Фейербаха, 7	
Р/рах. _____	№ _____
на № _____ від " _____ "	" _____ " 200_ р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор УкрДАЗТ, д.т.н., професор

М.І. Данько

3.09.2009

АКТ

**впровадження результатів дисертаційної роботи Панченка Сергія Володимировича
«Моделі і методи адаптивного керування параметрами руху засобів рейкового
транспорту»**

у навчальному процесі Української державної академії залізничного транспорту та
Інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів УкрДАЗТ

У докторській дисертації Панченка С.В. отримані нові наукові та практичні результати,
які використовуються :

- при викладанні дисциплін навчального плану спеціальності «Автоматика та автоматизація на транспорті»: теорія автоматичного керування; теорія і проектування складних систем; контролери та їх програмне забезпечення; системи залізничної автоматики;
- у дипломному та курсовому проектуванні;
- при підвищенні кваліфікації керівників та фахівців залізничного транспорту;
- при підвищенні спеціалізованого навчання фахівців служб сигналізації та зв'язку залізниць.

Перший проректор Укр.ДАЗТ,
професор

 В.М. Астахов



МІНІСТЕРСТВО ТРАНСПОРТУ ТА ЗВ'ЯЗКУ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА АДМІНІСТРАЦІЯ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ УКРАЇНИ

**ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
ДОНЕЦЬКА ЗАЛІЗНИЦЯ**

83001 м. Донецьк, вул. Артема, 68

Тел. (062) 319-44-50. Факс (062) 332-26-48

« ____ » _____ 200 ____ р.

№ _____

Затверджую

перший заступник начальника

ДП «Донецька залізниця»



« 10 » 08 2009 р.

Акт

**впровадження результатів
дисертаційної роботи Панченка С.В.**

Цей акт складено у тому, що зроблені у дисертації Панченка Сергія Володимировича нові методи моделювання технологічних процесів на залізницях використані в підсистемі диспетчерського керування на залізничних станціях Донецької залізниці.

Важливою особливістю розроблених в дисертації моделей і методів є можливість скорочення часу прийняття рішень диспетчерами, що підвищує ефективність управління.

Запропонована автором методологія і управління дає змогу відображати технологічні процеси перевезень на залізниці у динаміці, що має можливе значення для оперативного управління процесом перевезень, а також дозволяє планувати та прогнозувати технологічний процес перевезень.

Начальник служби перевезень

Касьянов А.В.

№ 028302

Вик. _____
Тел. _____

УКРАЇНА
Харківська міська рада
Управління комунального майна та приватизації
Харківської міської ради
Харківське комунальне підприємство
«Міськеелектротранс»
Фондена Трудового Червоного Прапора
ім. 60-річчя Радянської України
№ 03328623
61001, м. Харків, вул. Молодої Гвардії, 5
тел. 27-56-58
р/р № 260053012791 в ХОФ АК УСБ
МФО 351016
№ _____ від _____
На № _____ від _____

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Генеральний директор
Харківського комунального
Підприємства «Міськеелектротранс»
Почепецький С.О.

« 18 » _____ 2009 р.

Акт

Впровадження результатів дисертаційної роботи
Основні результати наукової роботи доцента Панченка Сергія
Володимировича, які запропоновані для використання на підприємстві
«Міськеелектротранс»
(м. Харків)

1. Логіко-динамічні моделі автоматизованого керування процесів перевезень трамваями на рівні диспетчерського керування, які відрізняються розширеними функціями при моделюванні процесів перевезень у динаміці.

2. Критерій оперативності прийняття рішень диспетчерами з можливістю вироблення керуючих дій у реальному часі.

3. Процедури виділення корисних сигналів із суміші сигнал-завада на основі адаптивної фільтрації шляхом динамічної параметрів фільтрів.

4. Нові аналітичні залежності параметрів настроювання адаптивних контролерів настроювання адаптивних контролерів для контурів керування швидкістю рейкових рухомих одиниць.

Представлені нові наукові результати впроваджуються:

- в нову перспективу автоматизовану диспетчерську систему керування параметрами руху транспортних засобів, яка буде приймати рішення щодо розподілу рухомих одиниць за маршрутами з вибором раціональної швидкості руху у реальному часі;
- в АРМ проектувальника бортових мікропроцесорних контролерів керування швидкістю транспортних засобів, який використовує отримані нові алгоритми адаптації, які реалізують підстроювання параметрів у реальному часі.

Впровадження на міському рейковому транспорті перспективної диспетчерської системи, бортових адаптивних контролерів поліпшить умови праці водіїв рухомих одиниць, підвищить дотримання графіку руху, що має великий соціальний ефект та дозволить отримати значний економічний ефект.

Начальник Служби руху

С.Панченко

Укіс О.І.

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Голова правління
ВАТ «Київ-Дніпровське МППЗТ»



В.І.Панкратов
 2009 р.

АКТ

впровадження результатів дисертації роботи к.т.н. Панченка С.В.
«Адаптивне керування рухомими об'єктами рейкового транспорту»

Для впровадження були запропоновані такі наукові та практичні результати:

- метод побудови ієрархічної розподіленої системи диспетчерського керування швидкістю рухомих одиниць;

- нові закономірності функціонування адаптивних контурів керування швидкістю поїздів, як об'єктів з розподіленими параметрами.

Отримані в дисертації результати використані при:

- створенні АРМ диспетчерського персоналу, який формує керуючі дії для завдання рекомендованої швидкості в контури керування рухомими одиницями;

- розробленні перспективних бортових адаптивних контурів керування швидкістю рухомих одиниць, які враховують наявність різноманітних завад у вимірюваних сигналах та змінювані параметри поїздів.

Заступник голови правління

Л.О.Грудзицький

ЗАТВЕРДЖУЮ:

**Заступник начальника
СТГО «Південна залізниця»**

М.Г. Аманець
Аманець М.Г.

« 7 » 2009р.

Акт

**про впровадження результатів
дисертаційної роботи Панченко С.В.**

Цим актом підтверджується, що протягом 2009р. на Південній залізниці були використані при проведенні робіт з удосконалення підсистем управління технологічними процесами перевезень (згідно з програмою реструктуризації на залізничному транспорті України, а також Директивою Ради Європейського співтовариства 91/440/ЕСС) такі результати дисертаційної роботи доцента Української державної академії залізничного транспорту Панченка С.В.:

- моделі оперативно-диспетчерського управління перевезеннями, які побудовані на основі графічного апарату мереж Петрі, які автор розширив введенням квазідвонаправлених дуг та багатофункціональних переходів;

- новий критерій оперативності прийняття рішень з підтвердженням правильності прийняття рішень;

- процедури вибору параметрів настроювання контурів керування рухомими одиницями, які забезпечують підвищення якості процесів керування.

Використання вказаних результатів дає змогу при побудові систем управління рейковим транспортом на основі моделювання процесів перевезень виконувати прогнозування перевезень, що важливо в умовах нестабільності перевезень та зміни різних впливаючих факторів.

**Заступник начальника
служби перевезень-
начальник ДЦУ**

П.В. Лубенченко

П.В. Лубенченко